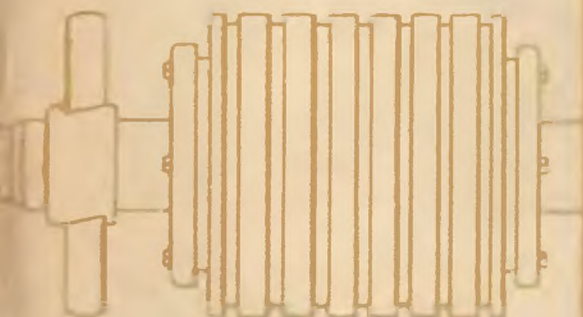


Р. Б. УМАНЦЕВ

**КОНСТРУКЦИИ
И РЕМОНТ
КОРОТКОЗАМКНУТЫХ
ОБМОТОК РОТОРОВ
КРУПНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**



Р. Б. УМАНЦЕВ

КОНСТРУКЦИИ
И РЕМОНТ
КОРОТКОЗАМКНУТЫХ
ОБМОТОК РОТОРОВ
КРУПНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

Уманцев Р. Б.

У52 Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей. М., «Энергия», 1967.

72 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 232)

Рассмотрены конструкции короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей, а также их ремонт на месте установки на предприятиях. Даны способы расчета основных параметров беличьих клеток. Изложены причины повреждения и технология ремонта обмоток короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей и пусковых обмоток синхронных двигателей. Приведены способы модернизации короткозамкнутых роторов, обеспечивающие более надежную работу двигателей, и способы реконструкции роторов асинхронных двигателей с контактными кольцами в короткозамкнутые. Предназначена для электромонтеров, бригадиров, мастеров, занятых ремонтом и эксплуатацией электрических машин.

3-3-10

6П2.12

113-67

Уманцев Рудольф Борисович

**Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов
крупных двигателей**

Редактор *Г. Г. Родин*

Художественный редактор *Д. И. Чернышев*

Технический редактор *Л. И. Гаврилина* Корректор *Е. В. Кузнецова*

Сдано в набор 22/IV 1967 г.

Подписано к печати 20/VII 1967 г.

Т-07043

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 3,78

Уч.-изд. л. 4,07

Тираж 10 000 экз.

Цена 14 коп.

Зак. 180

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является наиболее распространенным видом крупных двигателей, применяемых в настоящее время в народном хозяйстве как в установках промышленных предприятий, так и для собственных нужд электростанций.

Основными преимуществами двигателей с короткозамкнутыми роторами перед двигателями с контактными кольцами являются:

- а) простота конструкции;
- б) надежность в эксплуатации (благодаря простоте конструкции);
- в) обеспечение более простой возможности изготовления асинхронного многоскоростного двигателя только за счет конструкции обмотки статора; а также более простой возможности реконструкции асинхронного двигателя на месте установки с изменением номинальной скорости вращения путем изменения только обмотки статора;
- г) более надежная работа во взрывоопасных помещениях благодаря отсутствию очага возможного искрообразования — контактных колец и наиболее уязвимых мест электрической машины — электрической изоляции стержней;
- д) работа в подавляющем большинстве с прямым пуском и отсутствие дорогостоящей пусковой аппаратуры.

Основным недостатком короткозамкнутых роторов по сравнению с двигателями с контактными кольцами является невозможность практически обеспечить большие пусковые моменты, необходимые в приводах с тяжелым и плавным пуском (прокатные установки, приводы некоторых видов в цементной и бумажной промышленности и др.). Несмотря на относительную простоту и надежность конструкции, случаи выхода из строя короткоза-

мкнутых клеток роторов в эксплуатации довольно часты.

Причинами выхода из строя короткозамкнутых клеток могут явиться как заводские конструктивные или производственные дефекты, так и неправильная эксплуатация двигателей на предприятии.

В брошюре приводятся конструктивные и электрические данные основных серий короткозамкнутых асинхронных двигателей отечественного производства, находящихся в настоящее время в эксплуатации, некоторые конструкции короткозамкнутых роторов двигателей иностранных фирм и характерные виды ремонта и реконструкции короткозамкнутых клеток роторов мощностью от 100 кВт и выше.

Конструкция особо мощных и уникальных короткозамкнутых двигателей, которые устанавливаются в последнее время на электростанциях, таких как типа АТД мощностью до 5000 кВт, мощностью 8000 кВт с непосредственным водяным охлаждением, работающих в установках блоков 300 Мвт, в брошюре не приведены. Ремонт и модернизация этих двигателей выполняются только специализированными организациями совместно с заводами-изготовителями по специальным проектам.

Наряду с роторами асинхронных двигателей рассматриваются некоторые конструкции и виды ремонтов пусковых клеток роторов крупных синхронных двигателей, которые как по конструкции, так и по причинам повреждения и видам ремонта имеют много общего с обмотками короткозамкнутых роторов.

В брошюре использованы указания заводов-изготовителей машин и специализированных ремонтных организаций, а также опыт квалифицированных специалистов в области ремонта электрических машин.

Брошюра также имеет целью познакомить бригадиров и мастеров с основными электрическими параметрами короткозамкнутых обмоток роторов и связью этих параметров с конструктивными особенностями элементов короткозамкнутых клеток. Эти сведения необходимы для повышения профессионального уровня эксплуатационного и ремонтного персонала и могут быть всегда использованы для решения конкретных задач, связанных с ремонтом двигателей с короткозамкнутыми роторами, а также с определением причин повреждений.

О всех замечаниях просьба сообщать по адресу:
Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия», «Библиотека электромонтера».

1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК

Короткозамкнутую обмотку ротора, называемую также беличьей клеткой (рис. 1), можно рассматривать как многофазную обмотку, имеющую число фаз, равное числу пазов z_2 , причем в каждую фазу входит один стержень.

На рис. 2 схематически изображена обмотка ротора в виде беличьей клетки. Здесь показаны токи в стерж-

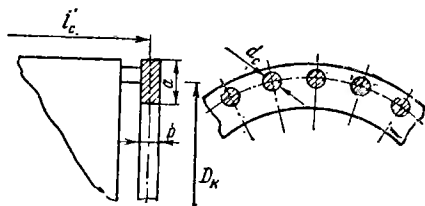


Рис. 1. Элементы короткозамкнутой обмотки.

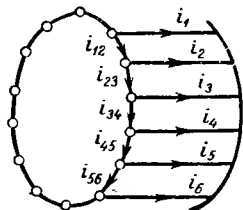


Рис. 2. Схема гоков в стержнях и участках короткозамыкающего кольца.

нях и частях короткозамыкающего кольца, лежащих между серединами соседних стержней. Токи в стержнях $i_1, i_2, i_3, \dots$ должны рассматриваться как линейные, а токи в частях кольца $i_{12}, i_{23}, i_{34}, \dots$ — как фазные. Исходя из этого, на рис. 3 построена диаграмма токов в соседних частях кольца I_k и в стержне I_c .

Определение величин токов и сопротивлений в элементах беличьей клетки часто бывает необходимо:

при выяснении причин повреждений обмотки и выборе способа их устранения;

при замене материала стержней или колец пусковой (см. ниже) клетки асинхронных или синхронных роторов в процессе модернизации двигателей для обеспечения необходимых пусковых свойств;

при переделке роторов с контактными кольцами в короткозамкнутые.

От величины токов и активных сопротивлений стержней и колец зависит нагрев короткозамкнутой обмотки и связанные с ним температурные напряжения и деформации в элементах беличьей клетки в период пуска и в рабочем режиме.

Из диаграммы, изображенной на рис. 3, можно определить соотношение токов кольца I_K и стержня I_c

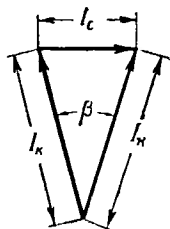


Рис. 3. Диаграмма токов в стержнях и на участках кольца.

где угол сдвига по фазе токов в соседних стержнях и частях кольца

$$I_K = I_c \frac{1}{2 \sin \beta}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2\pi p}{z_2}, \text{ рад.} \quad (2)$$

Здесь p — число пар полюсов двигателя;
 z_2 — число пазов ротора.

Для определения сопротивлений стержня r_c и соответствующего участка короткозамыкающего кольца r_K обратимся к рис. 1 и следующим формулам:

$$r_c = 1,24 \rho \frac{l'_c 10^{-2}}{S_c}, \text{ ом}; \quad (3)$$

$$r_K = 1,24 \rho \frac{\pi D_K 10^{-2}}{z_2 (ab)}, \text{ ом}, \quad (4)$$

где l'_c — длина стержня (до центров короткозамыкающих колец), см;

ρ — удельное сопротивление материалов стержня и кольца при температуре 15°C . Значения удельных сопротивлений при температуре 15°C (ρ_{15}) для основных материалов, из которых изготавливаются элементы беличьих клеток, приведены в табл. 1;

D_K — средний диаметр короткозамыкающего кольца, см;

S_c — сечение стержня, мм²;
 a и b — размеры кольца, мм;
 1,24 — коэффициент приведения сопротивления
 к стандартной температуре 75° С согласно
 ГОСТ 183-55.

Для приведения сопротивления обмотки к температуре, отличающейся от 15° С, существует формула

$$r_t = r_{15} [1 + \alpha(t - 15)], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где t — температура, при которой требуется определить сопротивление r_t ;

α — температурный коэффициент.

Для различных металлов коэффициент α различен; кроме того, величина коэффициента α зависит от температуры и может быть определена по формуле

$$\alpha = \frac{1}{235 + t}, \quad (6)$$

но для решения большинства практических задач при расчетах электрических машин величину α во всем диапазоне рабочих температур электрической машины часто принимают для меди, алюминия и бронзы $\alpha \approx 0,004$; для латуни $\alpha \approx 0,002$, для стали $\alpha \approx 0,006$.

Таким образом, сопротивление медной обмотки при температуре 75° С

$$r_{75} = r_{15} [1 + 0,004(75 - 15)] = 1,24 r_{15}.$$

Коэффициенты приведения сопротивления медной обмотки при более высоких температурах:

при 100° С $r_{100} = 1,34$

при 120° С $r_{120} = 1,42$

при 140° С $r_{140} = 1,54$.

Аналогично можно рассчитать сопротивление при любой температуре элементов беличьей клетки, выполненных из других материалов.

Сопротивление фазы беличьей клетки r_2 с учетом приведения схемы токов к эквивалентной многофазной звезде определяется по формуле

$$r_2 = r_c + \frac{2r_k}{\Delta^2}, \quad (7)$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2}. \quad (8)$$

Таблица 1

Металлы	$\rho_{15}, \text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$
Медь	0,0175
Алюминий литой	0,035*
Латунь обыкновенная (прутковая)	0,07
Латунь марганцовистая	0,107
Бронза фосфористая	0,14
БАЖМ (бронза, имеющая в своем составе алюминий, железо и марганец)	0,185
Сталь	0,14

* Здесь вместо истинного значения 0,029 дано условное значение 0,035 для учета окисления алюминия и увеличения примеси железа при расплавлении и заливке.

Ток стержня I_c , равный номинальному току ротора $I_{2н}$, определяется по следующей формуле:

$$I_c = I_{2н} = K_1 I_{1н} \frac{6\omega_1 K_{01}}{z_2}, \quad (9)$$

где $I_{1н}$ — номинальный фазный ток двигателя (в обмотке статора);

K_1 — коэффициент, зависящий от $\cos \varphi$ двигателя, определяется из кривой рис. 4;

ω_1 — число последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора;

K_{01} — обмоточный коэффициент статора, приблизительно равный 0,91—0,93.

Рассчитанные таким образом сопротивления называют часто омическими в отличие от активных сопротивлений, о которых будет сказано ниже.

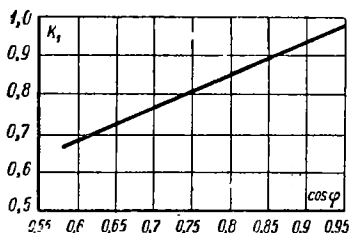


Рис. 4. Определение коэффициента K_1 в зависимости от коэффициента мощности двигателя.

Выбор сечения стержней и короткозамыкающих колец производится в зависимости от величины проходящего тока и допустимой удельной плотности тока для материала стержней и колец. Сечение стержня определяется

$$S_c = \frac{I_c}{\Delta_c}, \text{ мм}^2, \quad (10)$$

где Δ_c — плотность тока в стержне, а/мм^2 .

Так, например, в зависимости от формы сечения стержня, характера охлаждения двигателя, необходимого пускового момента, для медных стержней можно брать $\Delta_c = 5,5-8 \text{ а/мм}^2$.

Сечение короткозамыкающего кольца

$$S_K = \frac{I_K}{\Delta_K}, \text{ мм}^2,$$

где Δ_K — плотность тока в кольце, а/мм^2 .

Исходя из конструктивных соображений, берут $\Delta_K = (0,8-0,65)\Delta_c$.

В дальнейшем изложении при рассмотрении конструкций рабочих и пусковых клеток будут дополнены рекомендации по выбору сечений стержней и колец, выполняемых из различных материалов.

Пример: Определить токи стержня I_c и кольца I_K , а также омическое сопротивление фазы беличьей клетки $r_{2(75^\circ \text{C})}$ трехфазного асинхронного двигателя типа КАО 133-2 (рис. 6); 290 кВт; 6000 в; 2980 об/мин, если известны $I_{1H} = 36 \text{ а}$; $\omega_1 = 324$; $\cos \varphi = 0,87$; $z_2 = 38$; $D_K = 38 \text{ см}$; $S_c = 154 \text{ мм}^2$; $l'_c = 38 \text{ см}$; $S_K = 800 \text{ мм}^2$.

Омическое сопротивление стержня при температуре 75°C

$$r_c (75^\circ \text{C}) = 1,24 \rho \frac{l'_c \cdot 10^{-2}}{S_c} = 1,24 \cdot 0,0175 \frac{38 \cdot 10^{-2}}{154} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

Омическое сопротивление участка кольца

$$r_K (75^\circ \text{C}) = 1,24 \rho \frac{\pi D_K 10^{-2}}{z_2 (ab)} = 1,24 \cdot 0,0175 \frac{3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{38 \cdot 800} = 0,09 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

Омическое сопротивление фазы беличьей клетки

$$r_2 = r_c + \frac{2r_K}{\Delta^2} = 5,37 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,09 \cdot 10^{-5}}{0,2022^2} = 9,88 \cdot 10^{-5} \text{ ом},$$

$$\text{где } \Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{z_2} = 2 \sin \frac{180^\circ \cdot 1}{38} = 2 \sin 5^\circ 48' = 0,2022.$$

Ток стержня

$$I_c = I_{2H} = I_{1H} K_1 \frac{6\omega_1 K_{01}}{z_2} = 0,9 \cdot \frac{36 \cdot 6 \cdot 324 \cdot 0,91}{38} = 1190 \text{ а},$$

где $K_1 = 0,9$ при $\cos \varphi = 0,87$ (см. рис. 4).

Ток кольца

$$I_K = I_c \frac{1}{2 \sin \beta} = \frac{1190}{2 \cdot 0,165} = 3600 \text{ а},$$

где

$$\beta = \frac{2\pi p}{z_2} = \frac{360^\circ \cdot 1}{38} = 9^\circ 30'.$$

Плотность тока в стержне

$$\Delta_c = \frac{I_c}{S_c} = -\frac{1\,190}{154} = 7,73 \text{ а/мм}^2.$$

Плотность тока в короткозамыкающем кольце

$$\Delta_k = \frac{I_k}{S_k} = \frac{3\,600}{800} = 4,5 \text{ а/мм}^2.$$

Низкая плотность тока в короткозамыкающем кольце данного двигателя объясняется необходимостью развития сечения короткозамыкающего кольца, которое является конструктивной опорой стального бандажа.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ КОРТКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК РОТОРОВ

Большое разнообразие конструкций короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей, изготавливаемых отечественными заводами и иностранными фирмами, исходя из конструктивно-технологических признаков и области применения, можно подразделить на несколько типов.

Основные конструкции короткозамкнутых обмоток роторов крупных асинхронных двигателей:

- одноклеточные с круглыми медными стержнями (простая короткозамкнутая клетка);
- с глубоким пазом (глубокопазные);
- с двойной короткозамкнутой клеткой (двухклеточные);

со стержнями беличьей клетки (и, естественно, пазы ротора) специального профиля (бутылочного, клинообразного, трапецидального и т. п.).

Рототы с беличьими клетками, выполненными путем заливки пазов и короткозамыкающих колец алюминием. Такое исполнение обмоток роторов является преобладающим для двигателей мощностью ниже 100 квт.

Так как ремонт беличьих клеток, выполненных путем заливки алюминием, на месте установки двигателей на большинстве предприятий практически невозможен, то в данной брошюре мы только коротко остановимся

на особенностях этого способа изготовления беличьих клеток и дадим некоторые рекомендации по определению дефектов беличьих клеток таких двигателей.

При обнаружении дефектов роторы таких двигателей должны быть отправлены для перезаливки на завод-изготовитель или специализированное ремонтное предприятие.

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей, полученные путем переделки обмоток роторов с контактными кольцами:

одноклеточные;

двухклеточные;

беличьи клетки с наплавленными короткозамыкающими кольцами.

Беличьи клетки роторов синхронных двигателей.

Пусковые беличьи клетки синхронных двигателей можно рассматривать в едином разделе классификации, так как все они, как правило, состоят из круглых стержней, закладываемых в расположенные в полюсах ротора соответствующие пазы, и различаются только способом расположения и крепления короткозамыкающих сегментов, а также материалом стержней и колец.

Исключение в конструктивном отношении составляют пусковые клетки синхронных турбодвигателей на 3000 об/мин. Но так как ремонт их обычно связан с перемоткой рабочей обмотки роторов и выполняется только специализированными ремонтными организациями, в данной брошюре они не рассматриваются.

По требованиям, предъявляемым к прочности элементов беличьих клеток и соединений стержней с короткозамыкающими кольцами, короткозамкнутые обмотки делятся на две категории:

I — соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью 50 м/сек и выше;

II — соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью ниже 50 м/сек.

В качестве конструктивных мер, способствующих повышению прочности короткозамкнутых обмоток I категории, применяют:

цельные изготовленные из литых прокованных заготовок короткозамыкающие кольца;

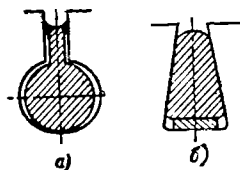


Рис. 5. Закрепление в пазах стержней специальной формы.

а — бутылочной — чечканкой; б — трапециевидальной — подклиновкой.

надежное закрепление в пазах стержней специальной формы (рис. 5);

увеличение сечения короткозамыкающих колец и площади контакта соединения стержня с кольцом;

бандажные кольца из стальных поковок, закрепляемые на короткозамыкающих кольцах;

специальные припои главным образом марки ПСР-45 с 45% -ным содержанием серебра.

Для обмоток II категории допускается применение сварных короткозамыкающих колец с одним или несколькими стыками и применение менее качественных припоев (например, марки ПМФ-7).

В ряде случаев соединения роторов с окружной скоростью ниже 50 м/сек, но работающих в установках с тяжелым пуском, следует относить к соединениям I категории.

Для определения окружной скорости v пользуются следующей формулой:

$$v = \frac{\pi D_k n}{100 \cdot 60}, \text{ м/сек,} \quad (11)$$

где n — номинальная скорость вращения двигателя, об/мин.

Теперь перейдем к рассмотрению конструктивных форм короткозамкнутых обмоток согласно приведенной выше классификации. При ознакомлении с конструкцией обмоток кратко охарактеризуем пусковые и рабочие свойства короткозамкнутых обмоток и определим причины возникновения тех или иных конструкций беличьих клеток.

Основные конструкции короткозамкнутых обмоток крупных роторов асинхронных двигателей. Одноклеточные роторы с круглыми медными стержнями. К этому типу можно отнести ротор асинхронного двигателя типа КАМО 133-2; 290 квт; 6 000 в; 2980 об/мин, изображенный на рис. 6. Сердечник ротора состоит из пакетов 1, набранных из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и плотно насаженных на вал 2. С обеих сторон сердечник зажат нажимными шайбами 3, а от проворота по валу предохраняется продольной шпонкой 4. Нажимные шайбы фиксируются пружинными кольцами 5, закладываемыми в специальные кольцевые проточки на валу ротора. Для предотвращения распушения сердечника в пазовой зоне под на-

жимные шайбы закладываются крайние листы 6 из листовой стали толщиной 3—5 мм.

Беличья клетка состоит из 38 медных стержней 7 диаметром 14 мм и длиной 390 мм и двух медных короткозамыкающих колец 8, спаянных со стержнями и посаженных на выточки нажимных шайб. Короткозамыкающие кольца закрепляют бандажными кольцами 9

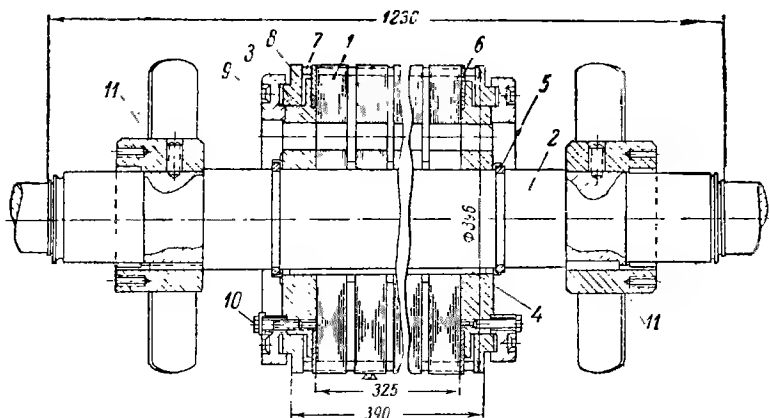


Рис. 6. Ротор асинхронного двигателя типа КАМО 133-2.

из стальных поковок. Последние крепятся болтами 10 к нажимным шайбам.

В бандажных кольцах расположены кольцевые выточки для помещения балансировочных грузов. С обеих сторон ротора помещены вентиляторы 11, способ крепления которых ясен из рисунка. Основные размеры ротора указаны на чертеже.

По критериям прочности беличью клетку этого ротора следует отнести к конструкции I категории, так как его окружная скорость

$$v = \frac{\pi D_k n}{100 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 39,6 \cdot 2980}{6000} = 61,7 \text{ м/сек.}$$

Стальное бандажное кольцо должно обеспечить прочность узла короткозамыкающих колец.

В настоящее время асинхронные двигатели с простыми беличьими клетками почти не изготавливают, но в эксплуатации находятся еще много таких двигателей отечественного производства и иностранных фирм. В табл. 2

Таблица 2

Тип двигателя	Количество пакетов активной стали	Общая длина активной стали, мм	Размеры стержней длина/диаметр, мм	Вес стержня/кольца, кг
КАМО 132-2	4	255	320/14	0,45/17,7
КАМО 133-2	6	325	390/14	0,55/17,7
КАМО 134-2	8	405	470/14	0,66/17,7

Примечание. У всех роторов размеры и конструкция медных короткозамыкающих колец одинаковы (см. рис. 6), а число стержней — 38.

приведены основные данные беличьих клеток роторов асинхронных двигателей типа КАМО.

Роторы с глубоким пазом (глубокопазные). Появление глубокопазных роторов было связано с необходимостью увеличения начального пускового момента двигателя в условиях тяжелых пусков под нагрузкой.

Кратность начального пускового момента ($M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$ — отношение начального пускового момента к номинальному) двигателей с простой беличьей клеткой, находящихся в эксплуатации, составляет обычно 0,7—1,3 у различных двигателей, а у некоторых моделей и еще ниже — до 0,4.

В то время, как этот показатель регламентируется ГОСТ 183-55 и в зависимости от отношения мощности двигателя P (квт) к синхронной скорости вращения n (об/мин), отношение $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$ для трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью более 100 квт должно быть:

у двигателей с $n \leq 1500$ об/мин при $\frac{P}{n} \leq 1$ и у двигателей с $n = 3000$ об/мин при $\frac{P}{n} \leq 0,1$ — не ниже 0,9;

у двигателей с $n \leq 1500$ об/мин при $\frac{P}{n} > 1$ и у двигателей с $n = 3000$ об/мин при $\frac{P}{n} > 0,1$ — не ниже 0,7.

Следует заметить, что двигатель с простой короткозамкнутой клеткой может быть рассчитан и на большую кратность пускового момента (увеличением омического сопротивления обмотки ротора), но это вызывает увеличение номинального скольжения $s_{\text{н}}$, величина которого

может оказаться за пределами общепринятых значений. Потери энергии двигателя в рабочем режиме при этом сильно увеличиваются. Увеличение номинального скольжения от простого увеличения омического сопротивления беличьей клетки показано на рис. 7, где изображены графики зависимости момента двигателя от скольжения, называемые *механическими характеристиками*. Кривая 1 — механическая характеристика простого короткозамкнутого двигателя; кривая 2 — механическая характеристика того же двигателя с искусственно увеличенным омическим сопротивлением беличьей клетки (например, за счет изменения материала стержней или уменьшения сечения стержней); M_{n1} и M_{n2} — соответственно начальные пусковые моменты двигателя с разными беличьими клетками; отрезок $s_{n1}s_{n2}$ — увеличение скольжения при номинальном моменте M_n .

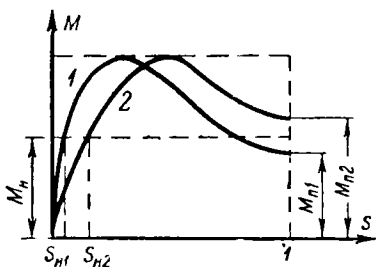


Рис. 7. Влияние увеличения активного сопротивления ротора на величину скольжения.

Глубокопазные двигатели позволяют увеличить кратность пускового момента (практически до 1,5—2) без увеличения номинального скольжения. В этих двигателях используется явление вытеснения тока в стержнях обмотки ротора, обусловленное пазовыми потоками рассеяния.

В начальный момент включения двигателя в сеть, когда скольжение $s=1$, частота в роторе равна частоте сети. В этом случае картина пазового потока имеет вид, изображенный на рис. 8, где показан график распределения плотности тока по высоте стержня. Из этого рисунка видно, что различные по высоте участки стержня сцеплены с различным числом линий потока рассеяния, причем наибольшее число линий приходится на нижний участок стержня. В результате в этих участках будут индуцироваться наибольшие э. д. с. рассеяния, а в верхних — наименьшие. Действие этих э. д. с. вызовет вытеснение тока к наружным частям проводника (распределение плотности тока по высоте проводника определяется кривой 1 на рис. 8); это и обусловит увеличение ак-

тивного сопротивления стержней ротора в момент пуска двигателя при частоте тока в роторе 50 гц.

По мере разгона ротора двигателя частота тока в беличьей клетке уменьшается, и при установившемся режиме она дойдет до очень малых значений — порядка 1—3 гц. При этом явление вытеснения тока будет ослабевать, и в конце концов ток распределится по сечению проводника равномерно (прямая 2 на рис. 8).

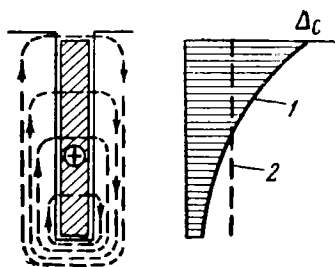


Рис. 8. Поток рассеяния пазов ротора и распределение плотности тока в стержне.

Активное сопротивление ротора будет при этом постепенно уменьшаться и в установившемся режиме станет практически равным омическому сопротивлению беличьей клетки. При нормальной скорости глубокопазный двигатель работает как обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, однако при

пуске благодаря увеличению активного сопротивления ротора, вызванного вытеснением тока, он имеет больший начальный момент.

Таким образом, активное сопротивление беличьей клетки в отличие от омического — величина переменная и зависит от частоты тока в роторе, т. е. от скольжения. Особый интерес представляет активное сопротивление при $s=1$, так как оно определяет величину пускового момента двигателя. Это сопротивление может быть определено по формуле

$$R_2 = \frac{R_c}{S_c} (l_c' + l_{1\kappa}) 10^{-2} + \frac{2p_k g^2 \pi D_k 10^{-2}}{s_k z_2}, \quad (12)$$

где l_1 — расчетная длина активной стали, равная длине стали ротора за вычетом половины вентиляционных каналов, см; κ — коэффициент, учитывающий влияние вытеснения тока; определяется в зависимости от высоты стержня по кривой рис. 9; g — отношение тока в кольце к току в стержне; определяется в зависимости от числа пазов на пару полюсов ротора по кривой рис. 10.

Предположим, что стержни двигателя, изображенного на рис. 6, выполнены не круглого сечения, а прямоугольного в виде узкой полосы, как это делается в глубокопазном роторе, с таким же сече-

нием, например 5×31 мм. Тогда омическое сопротивление r_2 в обоих вариантах будет одинаковым, а активное сопротивление в момент пуска R_2 для беличьей клетки со стержнями круглого сечения будет гораздо меньше, чем для глубокопазной клетки. Пользуясь кривыми рис. 9 и 10 и формулой (12), произведем подсчет:

$$R_{2\text{кр}} = \frac{(38 + 30 \cdot 0,25) \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 154} + \frac{2 \cdot 6^2 \cdot 3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 800 \cdot 38} = 1,082 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

для прямоугольных стержней

$$R_{2\text{пр}} = \frac{(38 + 30 \cdot 1,9) \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 155} + \frac{2 \cdot 6^2 \cdot 3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-2}}{57 \cdot 800 \cdot 38} = 1,577 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

$$\text{Отношение } \frac{R_{2\text{пр}}}{R_{2\text{кр}}} = \frac{1,577 \cdot 10^{-4}}{1,082 \cdot 10^{-4}} = 1,45.$$

Начальный пусковой момент двигателя в относительных единицах (в долях номинального момента) равен:

$$M_n \approx \frac{I_{2\text{к}}^2 R_2 z_2}{1000 P_2}, \quad (13)$$

где $I_{2\text{к}}$ — пусковой ток в пазу ротора, а;

R_2 — активное сопротивление ротора при пуске, ом;

z — число пазов ротора;

P_2 — номинальная мощность двигателя, квт.

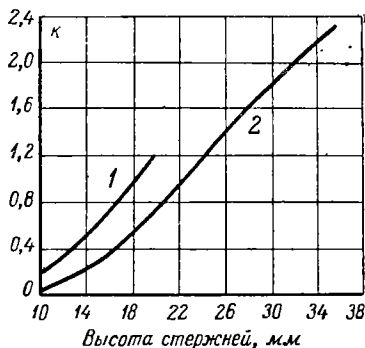


Рис. 9. Кривые для определения активного сопротивления стержней беличьих клеток двигателя.

1 — с двумя клетками; 2 — с одной клеткой.

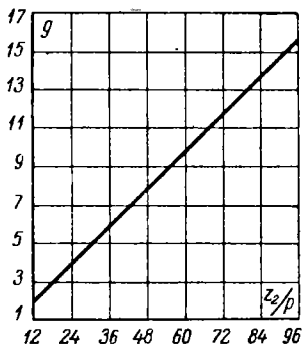


Рис. 10. Кривая для определения тока в кольце.

Из (13) и подсчитанного отношения $R_{2\text{пр}}/R_{2\text{кр}}$ следует, что начальный пусковой момент глубокопазного двигателя будет почти в 1,5 раза больше начального пускового момента такого же двигателя, но с простой беличьей клеткой.

Из (13) можно сделать еще один очень важный вывод. Для достижения необходимого пускового момента (в зависимости от приводимого механизма) при достаточно большом R_2 глубокопазного двигателя можно существенно снизить пусковой ток ротора. Пусковой ток статора $I_{1к}$ находится в следующей зависимости с током $I_{2к}$:

$$I_{2к} \approx 5,6 \frac{\omega_1 I_{1к}}{z_2}.$$

Следовательно, снижение тока $I_{2к}$ может быть произведено путем соответствующего уменьшения пускового тока двигателя $I_{1к}$.

Таким образом, глубокопазные двигатели позволяют снижать величину пускового тока двигателя, что повышает устойчивость работы питающей сети в случаях, когда мощность этой сети соизмерима с мощностью питаемого электрооборудования. Практически ограничение тока $I_{1к}$ может быть достигнуто или путем соответствующего расчета обмотки статора (пуск со звезды с переключением на треугольник для рабочего режима), или за счет введения дополнительной аппаратуры, снижающей подводимое к статору напряжение (автотрансформаторы, реакторы).

По конструкции глубокопазные роторы, кроме формы стержней и способа их крепления к короткозамыкающим кольцам, ничем не отличаются от роторов с простой беличьей клеткой.

На рис. 11,а приведен разрез паза глубокопазного двигателя типа А114-8, 250 кВт 500 в, а на рис. 11,б — эскиз соединения стержня этого двигателя с короткозамыкающим кольцом. Такой вид соединения характерен для большинства глубокопазных двигателей.

Согласно «Единой серии трехфазных ко-

роткозамкнутых асинхронных двигателей» двигатели с глубоким пазом принадлежат к 10—11-му габаритам: при числе полюсов $2p=6, 8$ и 10 для 10-го габарита и $2p=8$ и 10 для 11-го габарита.

Паспортные данные глубокопазных двигателей единой серии А представлены в табл. 3.

Из ранее выпускаемых нашей промышленностью глубокопазных двигателей мощностью выше 100 кВт основной является серия ГЛМО. Двигатели этой серии до

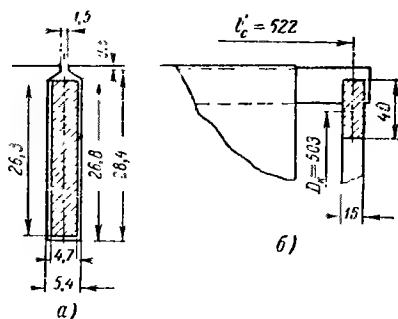


Рис. 11. Паз ротора и соединение стержня с кольцом глубокопазного двигателя типа А114-8.

Таблица 3

Тип двигателя	Номиналь- ная мощ- ность на валу, квт	Номинальное напря- жение, в	Отношение $M_{\text{д}}/M_{\text{н}}$
A101-6	100	220/380 и 500	1,4
A102-6	125	220/380 и 500	1,55
A103-6	160	380 и 500	1,45
A104-6	200	380 и 500	1,65
A103-6	100	3 000	1,7
A104-6	125	3 000	1,85
A101-8	75	220/380 и 500	1,2
A102-8	100	220/380 и 500	1,2
A103-8	120	220/380 и 500	1,3
A104-8	160	380 и 500	1,4
A101-10	55	220/380 и 500	1,2
A102-10	75	220/380 и 500	1,2
A103-10	100	220/380 и 500	1,3
A113-8	200	380 и 500	1,5
A114-8	250	380 и 500	1,7
A113-8	160	3 000	2,0
A114-8	200	3 000	2,0
A112-10	125	220/380 и 500	1,3
A113-10	160	380 и 500	1,3
A114-10	200	380 и 500	1,2
A112-10	100	3 000	1,55
A113-10	125	3 000	1,7
A114-10	160	3 000	1,75

настоящего времени работают в установках электростанций и промышленности. Основные данные двигателей 11, 12 и 13-го габаритов серии ГАМО завода «Электросила» приведены в табл. 4.

Роторы с двойной короткозамкнутой клеткой (двухклеточные). Глубокопазные двигатели, хотя и обеспечивают необходимый повышенный пусковой момент двигателя, но имеют существенные недостатки, исключающие использование этих двигателей в широком диапазоне скоростей и мощностей (подробнее о недостатках глубокопазных клеток будет сказано в разд. 3).

В связи с этим большое распространение получили асинхронные двигатели с двойной короткозамкнутой клеткой в роторе.

На рис. 12 представлена конструкция быстроходного ($n_c = 3\,000 \text{ об/мин}$) двухклеточного ротора асинхронного двигателя типа АТМ-500-2. Рабочая клетка этого двигателя состоит из 32 медных стержней диаметром 18 мм, которые спаяны фосфористой бронзой с латунными

Таблица 4

Тип двигателя	Мощность, <i>квт</i>	Напряжение, <i>в</i>	Ток статора, <i>а</i>	Кратность пускового тока	Длина ротора с каналами, <i>мм</i>	Диаметр ротора, <i>мм</i>	Число пазов ротора	Начальный пусковой ток в стержне ротора, <i>а</i>	Высота стержня, <i>мм</i>	Ширина стержня, <i>мм</i>
ГАМО11-4-4	115	220	367	5,2	190	350	50	4 070	30	4
ГАМО11-5-4	115	3 000	27	5,5	240	350	50	3 980	30	4
ГАМО11-6-4	135	3 000	31,5	5,8	290	350	50	4 170	30	4
ГАМО11-7-4	160	3 000	37,5	6,5	340	350	50	4 870	30	4
ГАМО11-4-6	75	220	249	6,0	190	390	58	3 500	30	3
ГАМО11-5-6	80	3 000	20	5,1	240	390	58	3 250	30	3
ГАМО11-6-6	100	3 000	24,5	5,6	290	390	58	3 850	30	3
ГАМО11-7-6	115	3 000	28,3	5,8	340	390	58	3 500	30	3
ГАМО12-6-4	200	3 000	46	5,1	290	420	46	4 600	40	3,5
ГАМО12-7-4	235	3 000	54	5,4	340	420	46	4 800	40	3,5
ГАМО12-8-4	270	3 000	62,5	6,3	390	420	46	5 740	40	3,5
ГАМО12-5-6	135	3 000	32,5	4,5	240	460	54	4 200	30	4,5
ГАМО12-6-6	165	3 000	40	4,5	290	460	54	4 320	30	4,5
ГАМО12-7-6	190	3 000	45	5,0	340	460	54	4 560	30	4,5
ГАМО12-8-6	220	3 000	52	5,5	390	460	54	5 120	30	4,5
ГАМО13-6-4	325	3 000	75	5,5	290	475	54	6 340	35	5
ГАМО13-7-4	375	3 000	85	5,6	340	475	54	6 290	35	5
ГАМО13-8-4	430	3 000	98	5,6	390	475	54	6 230	35	5
ГАМО13-7-6	270	3 000	64	5,4	340	525	72	4 770	30	4
ГАМО13-8-6	310	3 000	73,3	5,4	390	525	72	5 270	30	4

короткозамыкающими кольцами; последние одновременно являются и нажимными шайбами, стягивающими пакеты активной стали. Пусковая клетка состоит из 32 бронзовых стержней диаметром 18 мм, спаянных со стальными короткозамыкающими кольцами серебряным припоем марки ПСР-45.

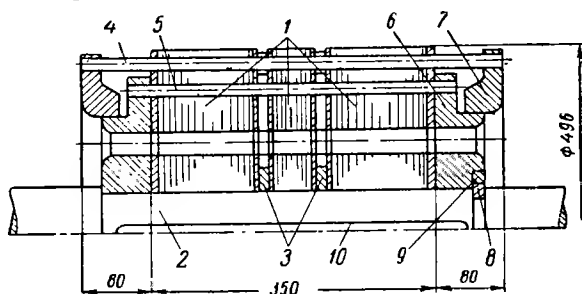


Рис. 12. Двухклеточный ротор асинхронного двигателя типа АТМ-500-2.

1 — пакеты шихтованного ротора; 2 — вал; 3 — дистанционные кольца; 4 — бронзовый стержень пусковой клетки; 5 — медный стержень рабочей клетки; 6 — латунное короткозамыкающее кольцо рабочей клетки; 7 — стальное короткозамыкающее кольцо пусковой клетки; 8 — кольцевая шпонка; 9 — предохранительное кольцо; 10 — шпонка.

Наибольший нагрев имеет место в стержнях и кольцах пусковой клетки в период пуска (достигает 300—400° С). Конструкция предусматривает свободное температурное удлинение стержней пусковой клетки; при этом стальные кольца пусковой клетки могут перемещаться по выточкам латунных колец рабочей клетки.

Следует заметить, что приведенная на рис. 12 конструкция роторов типа АТМ является устаревшей (выпускались нашими заводами до 1950 г.); но в эксплуатации, в установках собственных нужд электростанций и в промышленности в настоящее время находится много таких машин.

Некоторые данные о модернизации двигателей серии АТМ и рекомендации по реконструкции роторов типа АТМ первого выпуска будут приведены ниже.

Принцип действия двухклеточного двигателя следующий: стержни внутренней клетки глубже погружены в стальную среду сердечника с большей магнитной проводимостью для потоков рассеяния, чем внешняя клетка, и поэтому обладают значительно большим индуктивным сопротивлением при пуске двигателя, когда частота в роторе велика (в первый момент равняется частоте сети). Ток распределяется между обеими клетками (обмотками) обратно пропорционально их полным сопротивлениям, а так как внутренняя клетка имеет весьма большое индуктивное сопротивление, то и полное сопротивление получается в несколько раз больше полного сопротивления внешней клетки, индуктивное сопротивление которой практически равно нулю.

В верхней клетке, наоборот, ток при пуске имеет не только значительную величину, но вследствие очень малого индуктивного и большого активного сопротивления за счет применения материалов со сравнительно большим удельным сопротивлением (табл. 1) этой клетки является почти чисто активным током. Поэтому эта обмотка (клетка) создает весьма большой вращающий момент.

Следовательно, в период пуска вращающий момент развивается главным образом током внешней клетки, которая поэтому называется пусковой.

По мере возрастания скорости вращения ротора частота тока в его обмотках соответственно уменьшается, вследствие этого снижается индуктивное сопротивление внутренней клетки и увеличивается ее ток. В резуль-

тате эта клетка начинает создавать постепенно возрастающий вращающий момент.

При нормальной скорости вращения ротора и, следовательно, весьма небольшом скольжении индуктивное сопротивление внутренней клетки станет очень малым. Тогда вращающий момент будет создаваться главным образом внутренней клеткой, ток в которой будет значительно больше, чем во внешней клетке, из-за сравнительно

малого сопротивления внутренней клетки, изготовляемой из меди. Поэтому внутренняя клетка называется рабочей.

На рис. 13 показаны кривые моментов двухклеточного двигателя, развиваемых токами обеих клеток: кривая 1 — от внешней клетки; кривая 2 — от внутренней клетки; кривая 3 — суммарного момента.

Двигатели с двойной клеткой могут быть выполнены с любым значением пускового

момента — от номинального до двойного, а в некоторых специальных случаях — до тройного.

Материалом для рабочей клетки (как для стержней, так и для колец), как правило, является медь (обычно марок М1 и М2 по ГОСТ 859-41).

Для стержней пусковой клетки в отечественном электромашиностроении чаще всего применяют латуни, характеристика которых дана в табл. 5.

Кольца пусковой клетки, как и рабочей, в большинстве конструкций изготовляют медными. Но в отдель-

Таблица 5

Материал	Марка по ГОСТ 1019-47	Химический состав, %					Удельный вес, г/см ³	Удельное электро-сопротивление при 20° С ом·мм ² /м
		Медь	Свинец	Марганец	Разные при- mesi	Цинк		
Латунь	Л62	60,5—63,5	—	—	0,5	Ос- таль- ное	8,43	0,071
Латунь свинцови- стая	ЛС59-1	57—60	0,8—1,9	—	0,75		8,5	0,065
Латунь марганцо- вистая	ЛМц-58-2	57—60	—	1—2	1,2		8,5	0,108

ных типах двигателей как отечественного, так и иностранного производства для стержней и колец, кроме перечисленных материалов, применяют различные бронзы и даже сталь.

Формы пазов двухклеточного ротора могут быть различными (рис. 14), но наиболее употребительной для роторов крупных двигателей является форма, изображенная на рис. 14,б (обе клетки с круглыми стержнями).

Заводами Советского Союза выпускались двухклеточные асинхронные двигатели многих типов, в настоящее время они находятся в эксплуатации. Наибольшее распространение из них получили: для $2p=2$ двигатель типа АТМ; для $2p=4$; 6; 8; 10 и 12 двигатель типа ДАМСО. Основные данные короткозамкнутых обмоток этих типов двигателей приведены в табл. 6 и 7.

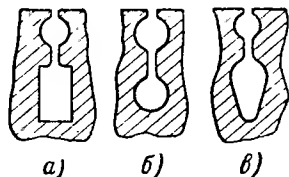


Рис. 14. Пазы двухклеточного ротора.

Следует отметить, что в прошлом двухклеточные двигатели нередко называли двигателями Бушера в связи с тем, что фирма, возглавляемая инж. Бушера, строила такие двигатели. Это было отражено буквой Б в обозначении типов двигателей, выпускавшихся нашими заводами БАМТ, БАМСО. Изменение шифра на ДАМТ,

Таблица 6

Тип двигателя	Длина активной стали ротора, мм	Длина стержня*, мм		Короткозамыкающие кольца				Общий вес ротора, кг
		Вес стержня, мм/кг		Пусковая клетка		Рабочая клетка		
		Пусковая клетка (бронза)	Рабочая клетка (медь)	Материал	Вес, кг	Материал	Вес, кг	
АТМ-500-2	350	$\frac{520}{1,18}$	$\frac{430}{0,98}$	Сталь	24	Латунь	43	935
АТМ-700-2	450	$\frac{620}{1,41}$	$\frac{530}{1,20}$					1 065
АТМ-850-2	525	$\frac{695}{1,58}$	$\frac{605}{1,37}$					1 275

* Общее количество стержней каждой клетки—32, диаметр стержней—18 мм.

Таблица 7

Габарит двигателя	Число полюсов двигателя типа ДАМСО, $2p$	Число пазов ротора, z_2	Стержни: $\frac{\text{верхний (латунь)}}{\text{нижний (медь)}}$				Короткозамыкающие кольца: $\frac{\text{верхнее (медь)}}{\text{нижнее (медь)}}$		
			Диаметр, мм	Полная длина при числе пакетов активной стали, мм				Средний диаметр, мм	Сечение $a \times b$, мм
				7	8	10	12		
14	4	52	15	532	582	682	—	495	20×47
			15	472	522	622		453	20×47
	6	82	12	507	557	657	—	566	$12,5 \times 37$
			11	464	514	614		533	16×37
	8	86	12	497	547	647	—	565	$12,5 \times 37$
			11	457	507	607		533	$12,5 \times 37$
	10 и 12	106	10	497	547	647	—	610	$12,5 \times 30$
			10	457	507	607		575	$12,5 \times 30$
15	4	50	17	—	504	584	664	574	16×62
			17	—	462	542	622	551	25×39
	6	82	12	464	504	584	664	670	16×47
			12	414	454	534	614	620	16×37
	8	86	12	502	555	655	755	692	$12,5 \times 37$
			11	462	512	612	712	650	16×37
	10 и 12	106	12	507	557	657	757	710	$12,5 \times 37$
			11	457	507	607	707	685	$12,5 \times 37$

Примечание. Обозначение двигателей типа ДАМСО, например, ДАМСО 1510-6: 15—габарит, 10—число пакетов активной стали (длина модели); 6—число полюсов.

ДАМСО связано с именем изобретателя двухклеточного двигателя — нашего соотечественника инж. М. О. Доливо-Добровольского.

Роторы с пазом специального профиля. Роторы с двойной короткозамкнутой клеткой для приводов, где пусковой момент может быть не выше $1,6 M_n$, с успехом могут быть заменены более надежными в эксплуатации и более простыми в технологии производства одноклеточными роторами с пазом специальной формы.

Одноклеточные роторы по сравнению с двухклеточными имеют следующие технологические преимущества:

при их использовании отпадает необходимость изготовления верхней клетки и связанной с ней сложной пайки стержней и колец, изготавливаемых из разных материалов;

не требуется наружной обработки короткозамыкающих колец (при двухклеточном исполнении отходы меди при обработке колец составляют до 10—15% веса колец);

упрощенная форма паза одноклеточного ротора позволяет применить компаундный штамп при изготовлении стальных листов сердечника ротора;

при повреждении внутренней клетки двухклеточного ротора в эксплуатации восстановительный ремонт ее слишком трудоемок, так как предварительно необходимо демонтировать верхнюю клетку, да и само обнаружение дефектов внутренней клетки при профилактических осмотрах двигателя с целью предупреждения аварий в эксплуатации чрезвычайно затруднительно.

В связи с этим на заводе «Электросила» имени С. М. Кирова для быстроходных и мощных двигателей была применена более простая и надежная конструкция одноклеточного ротора со стержнями «бутылочного» профиля. На рис. 15 показан разрез паза и стержня такого профиля, а также его связь с короткозамыкающим кольцом.

Медный стержень с утолщенной нижней частью помещается в паз бутылочной формы. Верхняя (прямоугольная) часть концов стержня срезана, а нижняя (цилиндрическая) входит в круглое отверстие короткозамыкающего кольца, также выполняемого из меди.

Надежность таких роторов при пуске выше, чем глубокопазных. Подробнее об этом будет сказано в разд. 3.

Принцип получения повышенного пускового момента ротора с бутылочным пазом аналогичен таковому в глубокопазном двигателе. Сравнительно большое активное сопротивление при пуске обеспечивается малым сечением верхней прямоугольной части бутылочного стержня.

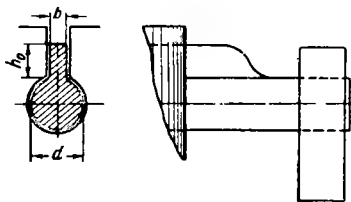


Рис. 15. Стержень и паз специального (бутылочного) профиля.

Как уже упоминалось, быстроходные двухклеточные двигатели типа АТМ реконструированы заводом «Электросила» имени С. М. Кирова и в настоящее время выпускаются как одноклеточные с пазом бутылочного профиля. Эксплуатационная надежность реконструированных двигателей повысилась.

Медь бутылочного профиля изготавливается в виде прессованной заготовки с грубыми допусками, а затем протягивается до точных размеров с допуском 0,3 мм.

Таблица 8

Номер про- филя	Размеры (рис. 15), мм		
	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>h₀</i>
1	9,0	4,0	12,0
2	10,5	4,0	12,0
3	12,0	4,0	12,0
4	14,0	4,0	12,0
5	18,0	5,0	12,0
6	20,0	5,5	12,0

На заводе «Электросила» имени С. М. Кирова применяют размеры меди бутылочного профиля, указанные в табл. 8.

Большинство крупных короткозамкнутых двигателей выпускаемой в настоящее время единой серии имеют одноклеточное исполнение с пазом бутылочного профиля. Технические данные короткозамкнутых асинхронных двигателей единой серии А, АЗ 12-го и 13-го габаритов с роторными стержнями бутылочного профиля представлены в табл. 9.

Что касается других видов стержней специальных профилей, то следует отметить серию асинхронных двухполюсных двигателей типа АТД, представляющую собой модификацию серии АТМ.

Двигатели серии АТД имеют следующую шкалу мощностей (квт).

500	} 1-й габарит
630	
800	
1 000	} 2-й "
1 250	
1 600	
2 000	} 3-й "
2 750	

Ротор двигателей типа АТД имеет короткозамкнутую обмотку со стержнями *трапецеидального* профиля.

По своим пусковым свойствам стержни трапецеидального профиля не уступают стержням бутылочного профиля, обладая в то же время рядом преимуществ.

Таблица 9

Тип двигателя	Номинальная мощность на валу, кВт	Номинальное напряжение, в	Номинальная скорость вращения, об/мин	Отношение M_{II}/M_I	№ профиля стержня согласно табл. 8	Число стержней Σ_2	Полная длина стержня, мм	Размеры сечения короткозамыкающего кольца, а×б, мм
A12-32-4 A312-32-4 A12-41-4 A312-41-4 A12-52-4 A312-52-4 A12-32-4 A312-32-4 A12-41-4 A312-41-4 A12-52-4	500 630 800 400 500 630	3 000 3 000 3 000 6 000 6 000 6 000	1 475 1 480 1 480 1 480 1 480 1 485	1,0 1,0 1,1 1,0 1,1 1,1	4/50		430 520 630 430 520 630	16×50
A312-52-4 A12-30-6 A312-30-6 A12-39-6 A312-39-6 A12-49-6 A312-49-6	320 400 500	3 000 3 000 3 000	980 980 985	1,0 1,0 1,2	2/86		410 500 600	
A12-34-6 A312-34-6	250	6 000	985	1,2	1/106		450	
A12-39-6 A312-39-6 A12-49-6 A312-49-6 A12-35-8 A312-35-8 A12-42-8 A312-42-8 A12-52-8 A312-52-8	320 400 250 320 400	6 000 6 000 3 000 3 000 3 000	985 985 735 735 735	1,3 1,2 1,0 1,1 1,0	2/86		500 600 450 530 630	
A12-35-8 A312-35-8	200	6 000	735	1,3	2/70		450	
A12-42-8 A312-42-8 A12-52-8 A312-52-8	250 320	6 000 6 000	740 740	1,1 1,1	2/86		530 630	

Тип двигателя	Номинальная мощность на валу, <i>квт</i>	Номинальное напряжение, <i>в</i>	Номинальная скорость вращения, <i>об/мин</i>	Отношение M_{II}/M_{II}	№ профиля стержня согласно табл. 8	Число стержней z_2	Полная длина стержня, <i>мм</i>	Размеры сечения короткозамыкающего кольца, $a \times b$, <i>мм</i>
A12-35-10	200	3 000	585	1,2	1/106	450	12,5×40	
A312-35-10								
A12-42-10	250	3 000	585	1,2				
A312-42-10								
A12-52-10	320	3 000	590	1,3				
A312-52-10								
A12-42-10	200	6 000	590	1,0				
A312-42-10								
A12-52-10	250	6 000	590	1,5				
A312-52-10								
A12-42-12	160	6 000	490	1,2	5/50	580	20×50	
A312-42-12								
A12-52-12	200	6 000	490	1,3				
A312-52-12								
A13-46-4	1 000	3 000	1 485	1,0	7/70	710	16×50	
A313-46-4								
A13-59-4	1 250	3 000	1 485	1,0				
A313-59-4								
A13-46-4	800	6 000	1 485	1,0				
A313-46-4								
A13-59-4	1 000	6 000	1 490	1,2	3/86	480	16×50	
A313-59-4								
A13-37-6	630	3 000	980	0,9				
A313-37-6								
A13-46-6	800	3 000	985	1,0				
A313-46-6								
A13-49-6	1 000	3 000	985	1,2				
A313-49-6								
A13-37-6	500	6 000	985	1,0				
A313-37-6								
A13-46-6	630	6 000	985	1,0				
A313-46-6								
A13-59-6	800	6 000	985	1,2	2/86	530	16×40	
A313-59-6								
A13-42-8	500	3 000	735	1,1				
A313-42-8								
A13-52-8	630	3 000	735	1,1	2/86	630	16×40	
A313-52-8								

Тип двигателя	Номинальная мощность на валу, <i>квт</i>	Номинальное напряжение, <i>в</i>	Номинальная скорость вращения, <i>об/мин</i>	Отношение $M_{ц}/M_{н}$	№ профиля стержня согласно табл. 8 Число стержней z_1	Полная длина стержня, <i>мм</i>	Размеры сечения короткозамкнутого кольца, <i>а×б, мм</i>
A13-42-8	400	6 000	735	1,3	2/86	530	16×40
A313-42-8							
A13-52-8	500	6 000	735	1,2		630	
A313-52-8							
A13-62-8	630	6 000	735	1,3		730	
A313-62-8							
A13-42-10	400	3 000	585	1,1	2/106	530	12,5×40
A313-42-10							
A13-52-10	500	3 000	585	1,1		630	
A313-52-10							
A13-42-10	320	6 000	590	1,1		530	
A313-42-10							
A13-52-10	400	6 000	590	1,1		630	
A313-52-10							
A13-62-10	500	6 000	590	1,1		730	
A313-62-10							
A13-42-12	250	3 000	490	1,3		530	
A313-42-12							
A13-52-12	320	3 000	490	1,2		630	
A313-52-12							
A13-62-12	400	3 000	490	1,2		730	
A313-62-12							
A13-42-12	200	6 000	490	1,2		530	
A313-42-12							
A13-52-12	250	6 000	490	1,4		630	
A313-52-12							
A13-62-12	320	6 000	490	1,3		730	
A313-62-12							

Плотно прижимаясь к стенкам паза путем подклиновки, они значительно улучшают теплоотдачу от стержней к стали ротора. Подклиновка предотвращает вибрации стержней в пазу, что повышает механическую надежность ротора. Кроме того, стержни трапецидального профиля проще в изготовлении, чем стержни бутылочного профиля.

Унификация профилей стержня ротора позволила довести для двигателей типа АТД число типоразмеров профилей до двух.

На рис. 16 приведены некоторые узлы и детали ротора двигателей типа АТД 1-го габарита.

Существенным изменением в роторах двигателей типа АТД по сравнению с типом АТМ является применение бандажных колец из немагнитной стали, которые защищают узел короткозамыкающие кольца — стержни от механических перегрузок, связанных с тепловым расширением кольца и действием центробежных сил, достигающих больших величин в роторах с большими окружными скоростями. В двигателях типа АТМ при-

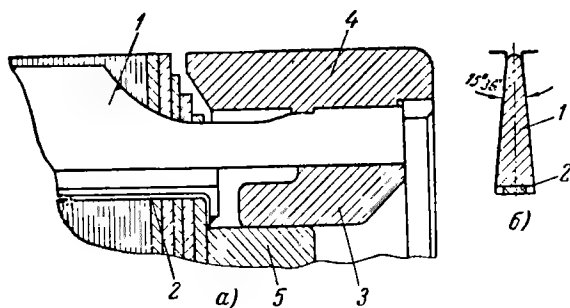


Рис. 16. Ротор типа АТД 1-го габарита.

а — конструкция беличьей клетки; б — сечение паза ротора; 1 — стержень трапециевидного сечения; 2 — роторный клин; 3 — короткозамыкающее кольцо; 4 — стальное бандажное кольцо; 5 — нажимное кольцо.

меняют бандажные кольца из магнитной стали, которые увеличивают начальный пусковой момент двигателя, но снижают максимальный момент и ухудшают рабочие характеристики, особенно коэффициент мощности. Сильно нагреваясь при пуске, магнитные бандажные кольца не препятствуют тепловому расширению короткозамыкающих колец, что вызывает появление больших изгибающих напряжений в стержнях обмотки ротора.

Роторы с беличьими клетками, полученными путем алюминиевой заливки. Заливка алюминием является главным видом исполнения роторов двигателей мощностью ниже 100 кВт, но в последнее время применяется и для более мощных двигателей (некоторые типы двигателей единой серии мощностью до 400 кВт).

Заливка алюминием является прогрессивным технологическим процессом, при котором с наименьшими затратами труда и материала получается готовая обмотка, состоящая из стержней, замыкающих колец и крылышек вентилятора. Заливка алюминием не предъявляет высоких требований к качеству поверхности стенок паза, может быть выполнена при любой форме паза и обеспечивает хороший контакт

между стержнями и кольцами без применения пайки или сварки. Отливка вентиляционных крылышек вместе с обмоткой обеспечивает хороший отвод тепла от обмотки и не требует изготовления отдельных вентиляторов.

В двигателях нормального исполнения для заливки роторов применяют исключительно первичный алюминий, который гарантирует необходимое постоянство электрического сопротивления. Малейшие следы примесей резко увеличивают удельное сопротивление и делают его неопределенным.

Основной трудностью, возникающей при заливке ротора, является возможность образования трещин, неполной заливки и разрывов стержней вследствие того, что алюминий, особенно в расплавленном состоянии, активно окисляется. Поэтому при заполнении формы легко могут образоваться трещины и разрывы в местах, где встречаются струи жидкого металла. Качество отливок в значительной степени зависит от температуры нагрева роторов перед заливкой и расплавленного алюминия. Как показывает практика, температуру нагрева роторов надо приближать к температуре плавления алюминия и не допускать больших перегревов расплавленного алюминия над температурой плавления. В процессе остывания роторные стержни дают усадку, которая отчасти компенсируется за счет сжатия сердечника ротора. Если сердечник перед заливкой слишком сильно спрессован, то могут происходить разрывы стержней.

Существует несколько способов заливки роторов алюминием: статический, центробежный, вибрационный, под давлением и др.

Подробнее с конструкциями, технологией производства и способами заливки алюминиевых роторов можно ознакомиться в [Л. 4].

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей, полученные путем переделки обмоток роторов с контактными кольцами. Характерной особенностью конструкций короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, является то, что каждая конструкция носит индивидуальный характер и предназначена для привода какого-либо конкретного механизма. Этим объясняется большое разнообразие исполнений таких обмоток как по конфигурации стержней и короткозамыкающих колец, так и по применяемым для элементов беличьей клетки материалам. Так, например, в серийных одноклеточных роторах асинхронных двигателей материалом для стержней и короткозамыкающих колец является медь.

В короткозамкнутых обмотках, переделанных из двигателей с контактными кольцами, в зависимости от произведенного расчета пускового и рабочего режимов двигателя, предназначенного для работы с данным конкретным механизмом, стержни одноклеточного ротора могут быть изготовлены из латуни или алюминия, а кольца — из латуни, алюминия, бронзы или стали.

В связи с тем что при переделке роторов двигателей с контактными кольцами часто используют стержни старой фазной обмотки, в паз короткозамкнутого ротора кроме стержней могут быть поставлены разного рода металлические прокладки и коробочки, которые уплотняют стержни в пазу, занимая место стоявшей ранее изоляции обмотки двигателя с контактными кольцами. Кроме того, эти прокладки могут влиять на пусковые свойства переделанного ротора.

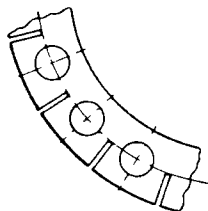


Рис. 17. Короткозамыкающее кольцо с прорезями.

Короткозамыкающие кольца не только могут изготавливаться из самых различных металлов, но и по конструкции могут быть решены разнообразно [например, общее короткозамыкающее кольцо для двухклеточной обмотки, межстержневые прорези, увеличивающие электрические сопротивления участков кольца (рис. 17), наплавленные кольца и другие варианты исполнения].

Приведем несколько конструкций короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами.

На рис. 18,а представлен переделанный из ротора с контактными кольцами короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя типа АЗ-4500-1500, $P_n=4\,500$ кВт, $U_n=6\,000$ в, $n_c=1\,500$ об/мин.

Стержни 1 и короткозамыкающие кольца 2 выполнены из латуни. Латунь для стержней выбрана из условий обеспечения повышенного пускового момента, так как она обладает значительно большим удельным электросопротивлением, чем медь. Нормальная работа стержней в рабочем режиме двигателя, когда ток распределяется равномерно по всему сечению стержня, обеспечивается увеличенным (по сравнению с сечением обмотки двигателя с контактными кольцами, состоявшей из двух изолированных медных стержней) сечением латунного стержня за счет использования места, занимаемого ранее изоляцией фазных стержней, а также за счет использования места пазового клина. Необходимость последнего в реконструированном роторе отпадает, так как его роль выполняет сам стержень (рис. 18,б, в).

Короткозамыкающие кольца представляют сварную заготовку с профрезерованными пазами. Что касается материала колец, то им могла бы быть и медь (от этого пусковые и рабочие качества двигателя изменились бы мало, так как необходимое сечение колец можно было бы выбрать и для меди). Но в данной конструкции выбрана для колец латунь из условий наиболее технологичного соединения однородных металлов стержней и колец. Соединение стержней с короткозамыкающими кольцами (рис. 18) выполнено серебряным

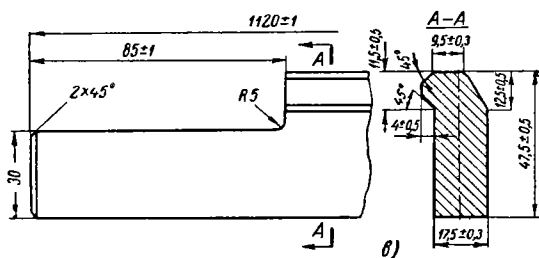
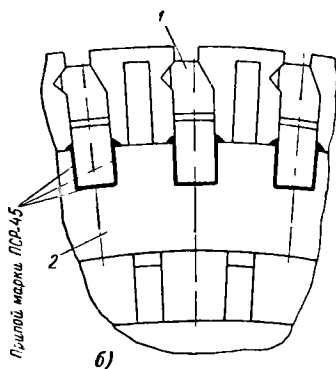
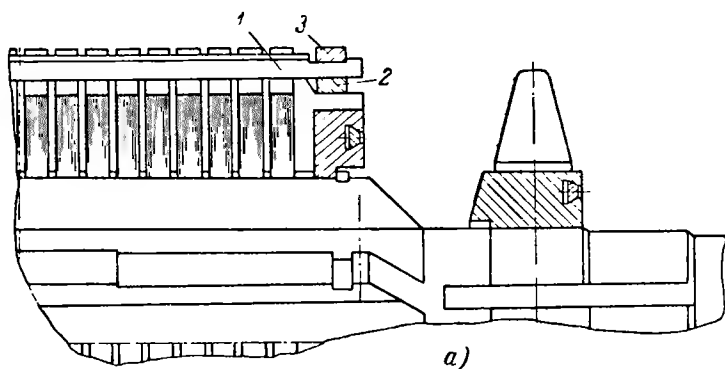


Рис. 18. Ротор типа АЗ-4500-1500.

а — общий вид; б — размещение стержня в пазу ротора и соединенные его с короткозамыкающим кольцом; в — чертеж стержня.

припоем марки ПСР-45 с тщательной пропайкой всех контактируемых поверхностей.

Бандажные кольца 3 предохраняют обмотку ротора от разрушения в результате больших механических напряжений, возникающих при работе двигателя от действия центробежных сил при окружной скорости этого ротора порядка 75 м/сек. Бандажные кольца изготовлены из специальной стали марки Б-Х18Н9Т. Заготовки в виде полу-

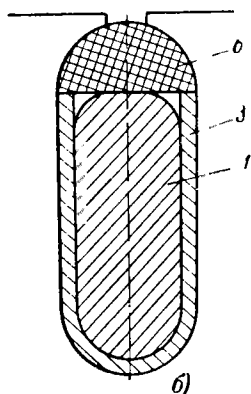
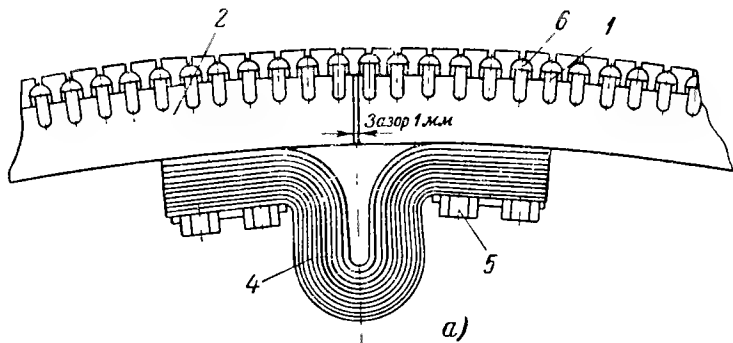


Рис. 19. Детали беличьей клетки.

a — соединение сегментов короткозамыкающего кольца при помощи компенсаторов; *б* — заполнение паза ротора.

колец устанавливают в специальные выступы стержней, крепят стягивающим приспособлением и сваривают в двух разъемах электросваркой с применением электродов марки УОНИ 13/пж диаметром 3,5 мм.

На рис. 19 представлены детали конструкции беличьей клетки ротора переделанного двигателя с контактными кольцами фирмы Сан Георгия (Италия), 427 кВт, 6 000 в, 145,5 об/мин.

Двигатель установлен в цехе химического завода и является приводом компрессора. Переделка на короткозамкнутое исполнение была связана с упрощением системы пуска двигателя и ликвидацией воз-

можных очагов искрообразования в роторе с контактными кольцами (пробой изоляции стержней, перекрытие контактных колец).

Для стержней 1 (рис. 19) беличьей клетки использованы старые стержни обмотки ротора с контактными кольцами. Вместо слюдяной изоляции стержней в паз вставляется стальная коробочка 3. Крепление стержня и коробочки в пазу осуществляется текстолитовым клином 6.

Медное короткозамыкающее кольцо 2 диаметром около 2 м состоит из нескольких сегментов, спаянных серебряным припоем. Оптимальные размеры сегментов и их количество определяется технологическими соображениями и наличием соответствующего станочного оборудования.

В четырех местах соединение сегментов короткозамыкающего кольца осуществляется с помощью компенсаторов 4, набранных из медных пластин толщиной 2 мм. Концы пакетов скреплены медными заклепками. Компенсаторы крепятся к короткозамыкающим сегментам болтами 5. После закрепления компенсаторов концы пакетов пропаивают серебряным припоем, одновременно пропаивается место контакта компенсаторов с сегментами. В местах установки компенсаторов между соседними короткозамыкающими сегментами оставляют зазор около 1 мм, который обеспечивает свободное удлинение частей короткозамыкающего кольца от действия высоких температур, возникающих главным образом в процессе пуска двигателя.

Следует отметить, что установка компенсаторов в конструкциях с крупногабаритными короткозамыкающими кольцами не всегда необходима и определяется тепловым и механическим расчетами при конструировании беличьей клетки.

Наиболее часто подвергаются переделке в короткозамкнутое исполнение роторы двигателей с контактными кольцами типов АМО, ФАМСО в диапазоне мощностей 100—500 кВт при скоростях вращения 600—1 500 об/мин. При переделке этих двигателей ротор, как правило, снабжают двумя беличьими клетками. При двух беличьих клетках можно получить высокий пусковой момент и использовать стержни старой обмотки. Внутренняя клетка обычно выполняется из медных стержней и медных колец, наружная — из медных стержней и стальных или медных колец.

Расположение колец и вылетов стержней может быть выполнено по одному из видов, показанных на рис. 20. В конструкции по рис. 20,а—в кольца изготовляют отдельно из меди или стали, снабжают нарезными пазами и припаивают к стержням. Расположение колец и вылетов стержней по рис. 20,а и б обеспечивает доступ к местам пайки колец со стержнями и дает возможность производить ремонт (пропайку) рабочей клетки без разборки пусковой клетки. Концентрическое расположение колец по рис. 20,а облегчает их центровку при сборке. Однако расположение колец по рис. 20,б имеет то пре-

имущество, что кольца обеих клеток могут быть обработаны после пайки на станке за один прием, между тем, как при расположении колец по рис. 20,а ротор надо ставить на станок 2 раза.

Возможно также расположение колец, показанное на рис. 20,в. Такая конструкция несколько проще, так как при этом нет необходимости изгибать стержни рабочей

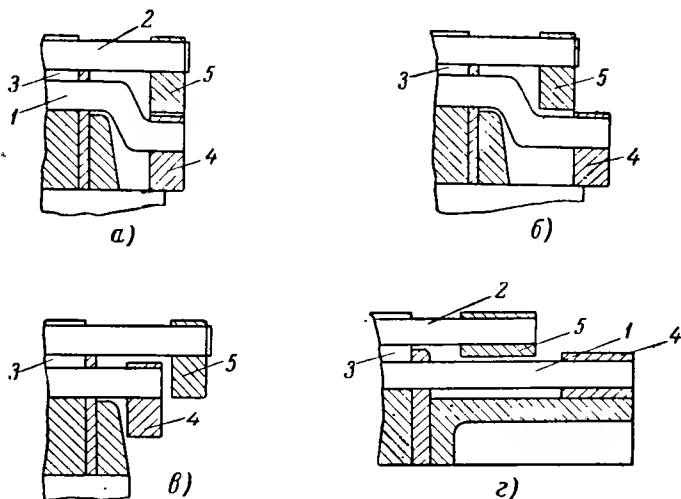


Рис. 20. Расположение короткозамыкающих колец в роторах, переделываемых из роторов с контактными кольцами.

1 — стержень рабочей клетки; 2 — стержень пусковой клетки; 3 — стальная прокладка; 4 — кольцо рабочей клетки; 5 — кольцо пусковой клетки.

клетки. Однако, если паяные соединения рабочей клетки были выполнены неудовлетворительно, то при данной конструкции нельзя произвести ремонт без полной разборки пусковой клетки. Поэтому рекомендуется располагать кольца согласно рис. 20,а и б.

Расположение колец по рис. 20,г применяется в тех случаях, когда кольца обеих клеток выполняют наплавленными из меди. Отличительной особенностью этого способа является сохранение обмоткодержателей ротора с контактными кольцами. В конструкциях по рис. 20,а—в обмоткодержатели срезают полностью или обтачивают настолько, чтобы освободить место короткозамыкающему кольцу рабочей клетки.

Заполнение паза ротора для переделываемых двигателей средней мощности (от 100 до 500 кВт) чаще всего выглядит так, как это представлено на рис. 21, где h_p и h_{π} — высота стержня соответственно рабочей и пусковой клеток, мм; b_p и b_{π} — ширина паза ротора за вычетом ширины вертикальной стальной прокладки для рабочей и пусковой клеток, мм; $h_{ж}$ — высота стальной прокладки между стержнями, мм; $a_{ж}$ — ширина воздушного зазора между межстержневой прокладкой и стенкой паза, мм.

Подобное заполнение паза характерно как для использования стержней ротора с контактными кольцами, так и для стержней, специально изготовляемых из новой меди. Естественно, что при использовании стержней ротора с контактными кольцами $h_p = h_{\pi}$ и $b_p = b_{\pi}$.

При проектировании стержней из новой меди эти размеры в зависимости от расчета могут быть и разными.

При разных величинах b_p и b_{π} боковая стальная прокладка делится по высоте паза на две прокладки различной толщины в соответствии с размерами b_p и b_{π} .

Стальные прокладки для заполнения пространства между стержнями нарезают на строгальном или фрезерном станке из стали марки Ст. 3. Прокладки имеют параллельные грани и удерживаются в пазах силой трения. Для облегчения сборки прокладки могут быть по длине разделены на две половины, которые забивают в паз с обоих концов ротора. Прокладки могут находиться в середине паза или прилегать к одной из его стенок.

Величина зазора $a_{ж}$ влияет на индуктивность пусковой клетки, а следовательно, и на пусковые свойства двигателя и определяется специальным расчетом.

Пусковые клетки роторов синхронных двигателей. Подавляющее большинство синхронных двигателей имеет асинхронный пуск, т. е. двигатели запускаются при помощи асинхронной обмотки ротора, представляющей собой обыкновенную беличью клетку.

Беличья клетка ротора синхронного двигателя состоит, как правило, из круглых медных или латунных

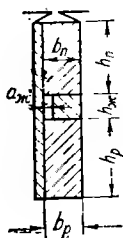


Рис. 21. Заполнение паза короткозамкнутого ротора, переделываемого из ротора с контактными кольцами.

стержней, вставленных в пазы, расположенные в полюсных башмаках.

Короткозамыкающее кольцо образуется из отдельных сегментов (по количеству полюсов ротора).

Сегменты чаще всего соединяют болтами или непосредственно накладывают один на другой выступающими концами или соединяют специальными накладками (иногда компенсаторами).

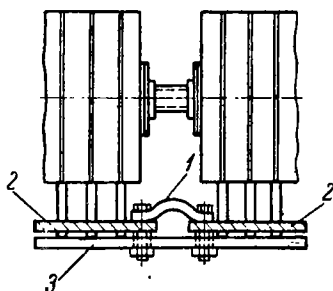


Рис. 22. Пусковая клетка синхронного двигателя со стальным бандажным кольцом.

представленная на рис. 22, характерна наличием компенсаторов 1, соединяющих сегменты полюсов 2, и стального бандажного кольца 3, предохраняющего беличью клетку от разрушения под действием центробежных сил.

Соединение сегментов со стержнями осуществляется пайкой различными твердыми припоями и практически ничем не отличается от приведенных выше соединений короткозамыкающих колец со стержнями в асинхронных двигателях.

Ниже приведено несколько конструктивных исполнений беличьих клеток синхронных двигателей. Конструкция, пред-

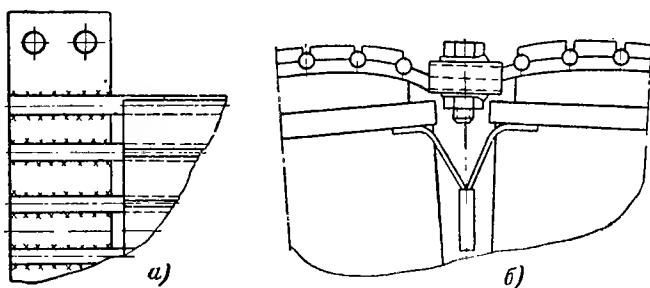


Рис. 23. Пусковая клетка синхронного двигателя с кольцами, расположенными плашмя.

а — соединение стержней с сегментами; *б* — соединение сегментов.

На рис. 23 представлена конструкция, в которой соединение сегментов производится при помощи хомутиков и болтов, соединяющих выступающие концы сегмен-

тов. Отличительной особенностью этой конструкции, как видно из рисунка, является расположение сегментов плашмя. Такое расположение сегментов позволяет увеличить площадь контакта сегментов со стержнями, а также снижает механические напряжения в кольце, возникающие от температурных факторов в период прохождения большого пускового тока. Изготовление сегментов, расположенных плашмя, технологически проще, чем сегментов, располагаемых на ребро.

Основным недостатком конструкции с сегментами, расположенными плашмя, является неудовлетворительная работа беличьей клетки при неодинаковом температурном удлинении отдельных стержней полюса — основной причине повреждения пусковых клеток синхронных двигателей. Беличья клетка с сегментами, расположенными на ребро, несколько проще воспринимает механические напряжения от неравномерного удлинения стержней полюса. В этом отношении большой интерес представляет новая конструкция пусковой клетки с компенсаторами на концах стержней. На рис. 24,а представлена такая конструкция для синхронного двигателя мощностью 2 000 кВт со скоростью вращения 1 000 об/мин. Соединение медных стержней 1 с короткозамыкающими сегментами 2 осуществлено при помощи компенсаторов 3, которые представляют собой набор медных пластин особой формы, обеспечивающей необходимое для прохождения пускового тока сечение меди. В специальные вырезы стержней и короткозамыкающих колец пластины компенсатора впаиваются серебряным припоем марки ПСР-25. Для более плотного контакта со стержнем и кольцом пакеты компенсатора после вставки расклинивают медными пластинами-клиньями 4.

Таким образом, все температурные изменения длины стержней пусковой клетки благодаря работе компенсаторов не приводят к недопустимым механическим напряжениям в месте соединения стержня с кольцом. На рис. 24,б показана схема установки компенсаторов на полюсе двигателя. Как видно из рисунка, для каждого стержня достаточно только одного компенсатора либо с передней, либо с задней стороны. И только крайние стержни каждого полюса имеют компенсаторы с обеих сторон. Объяснением этому служит то обстоятельство, что, как показывают проведенные исследования, пусковой ток в крайних стержнях значительно боль-

ше, чем в средних (иногда на 30—40%), отсюда и больший их нагрев и удлинение при пуске. При двух компенсаторах обеспечивается более надежная работа крайних стержней.

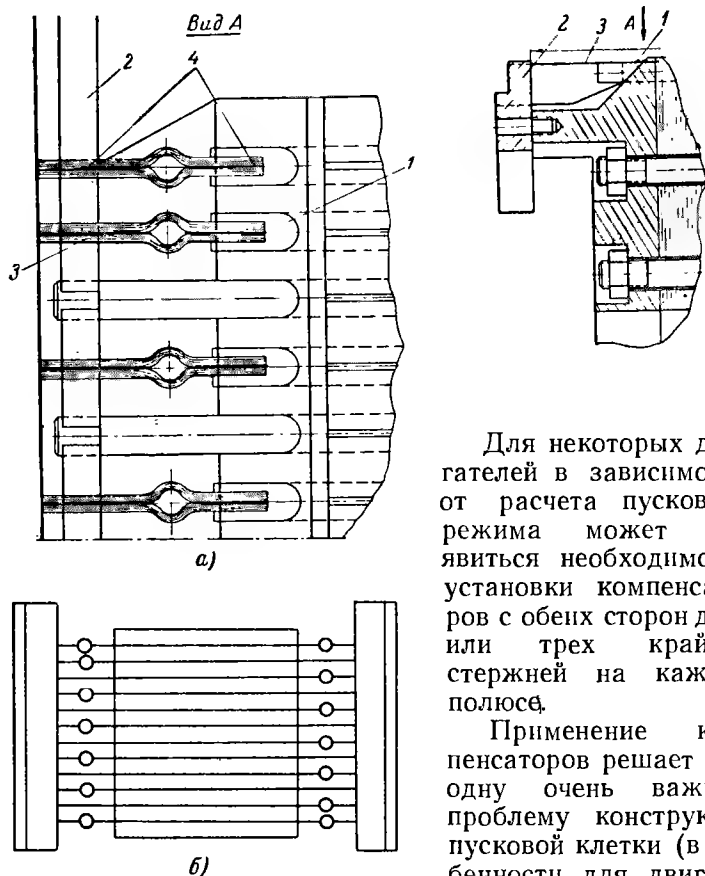


Рис. 24. Соединение стержней пусковой клетки с сегментами с помощью компенсаторов.

Для некоторых двигателей в зависимости от расчета пускового режима может появиться необходимость установки компенсаторов с обеих сторон двух или трех крайних стержней на каждом полюсе.

Применение компенсаторов решает еще одну очень важную проблему конструкции пусковой клетки (в особенности для двигателей, имеющих высокую скорость вращения) — крепление короткозамыкающих сегментов.

В рассмотренной конструкции (рис. 24) короткозамыкающие сегменты наглухо прикреплены к основанию полюсов, так как компенсаторы исключают необходимость аксиального перемещения короткозамыкающих колец при температурном удлинении стержней. Это зна-

чительно повышает надежность работы короткозамыкающих колец, имеющих большие динамические нагрузки от центробежных сил. Последнее обстоятельство позволяет увеличить сечение короткозамыкающих сегментов с тем, чтобы снизить плотность тока в кольцах,

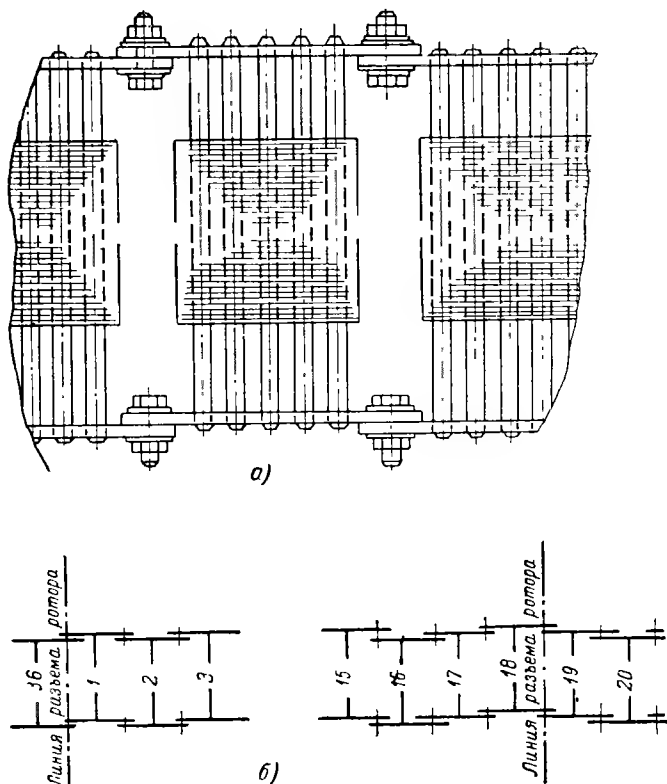


Рис. 25. Пусковая клетка разъемного ротора синхронного двигателя.

а — соединение сегментов; *б* — схема расположения сегментов с учетом аксиального сдвига половин ротора. Цифры указывают номер сегмента.

уменьшить их нагрев за период пуска и избежать чрезмерных внутренних температурных напряжений в материале наглухо закрепленных сегментов.

На рис. 25 представлена конструкция пусковой клетки тихоходного синхронного двигателя с сегментами, рас-

положенными на ребро. Соединение сегментов осуществляется выступающими концами, на болтах, без дополнительных соединяющих деталей. Схема расположения сегментов предусматривает монтаж полюсов (вставку) с разных сторон ротора, а также возможность смещения одной половины ротора (в случае разъемной конструкции ротора большого размера) относительно другой в аксиальном направлении.

Мы рассмотрели основные виды конструкций пусковых клеток синхронных двигателей. На практике или в литературе могут встретиться конструкции, в некоторых деталях отличные от разобранных по способу крепления и соединения сегментов и другим деталям, но принципиально они могут быть отнесены к одной из приведенных конструкций. Принцип расчета параметров пусковых клеток синхронных двигателей ничем не отличается от приведенного выше способа определения пусковых параметров беличьих клеток асинхронных двигателей.

3. ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРТОКОЗАМКНУТЫХ ОБМОТОК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Виды повреждений. Наиболее характерные и часто встречающиеся в практике эксплуатации повреждения беличьих клеток заключаются в обрывах стержней. Обрыв стержня может произойти либо в пазовой части, либо на выступающем из активной стали конце, причем при обрыве стержня на выступающем конце различают два случая: обрыв на выходе из паза; отрыв стержня от короткозамыкающего кольца.

Обрыв выступающего конца стержня особенно неприятен, так как при этом не только выходит из строя обмотка ротора, но и весьма часто обмотка высокого напряжения статора, так как оторванные концы стержней под действием центробежных сил отгибаются в направлении лобовых частей статорной обмотки и пререзают их. Восстановление же обмотки статора — дело очень сложное и дорогостоящее.

Часто имеют место трещины стержней, которые нарушают нормальную работу короткозамкнутой обмотки.

В большинстве случаев в месте трещин довольно быстро наступает разрыв стержня, но иногда беличья

клетка может сравнительно продолжительное время работать с лопнувшими (надтреснутыми) стержнями. Последнее весьма нежелательно в том отношении, что двигатель при этом работает не нормально, а обнаружить трещины доступными на месте эксплуатации средствами при профилактических осмотрах не всегда представляется возможным, и двигатель может аварийно выйти из строя в самое неподходящее для производственного процесса время.

К частым видам повреждения следует отнести распайки мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами. Этот вид повреждения почти всегда является следствием некачественно произведенной пайки. При хорошо выполненных пайках распайка мест соединения — явление чрезвычайно редкое.

К менее частым видам повреждения следует отнести разрывы короткозамыкающих колец под действием динамических напряжений от центробежных сил (в двигателях с большими окружными скоростями) или в результате механических перенапряжений, возникающих от температурных факторов, а также подгары болтов и разрывы мест соединений сегментов в пусковых клетках синхронных двигателей.

При профилактическом осмотре короткозамкнутых обмоток следует обращать внимание на повреждения, которые, если еще не привели к аварийному выходу двигателя из строя, то в конечном итоге приведут к обрыву стержней или распайке мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами. К таким повреждениям, кроме упомянутых выше трещин стержней, можно отнести:

смещение беличьей клетки, при этом короткозамыкающие кольца с обеих сторон ротора будут находиться на разных расстояниях от активной стали (рис. 26,а);

горбообразный прогиб выступающих из активной стали концов стержней (рис. 26,б). Деформациям такого вида могут быть подвергнуты все или некоторые стержни беличьей клетки. В пусковых клетках синхронных двигателей это явление чаще всего можно наблюдать у крайних на каждом полюсе стержней;

изгиб концов стержней в направлении вращения ротора от усилия скручивания короткозамыкающим кольцом (рис. 26,в). Это явление может иметь место в роторах с большими окружными скоростями и массивны-

ми короткозамыкающими кольцами, в особенности, если инерция короткозамыкающего кольца увеличивается в значительной степени наличием глухо скрепленного с ним стального бандажного кольца;

волнообразный изгиб расположенных на ребро короткозамыкающих колец (или сегментов) от неравномерного удлинения отдельных стержней. Чаще всего это

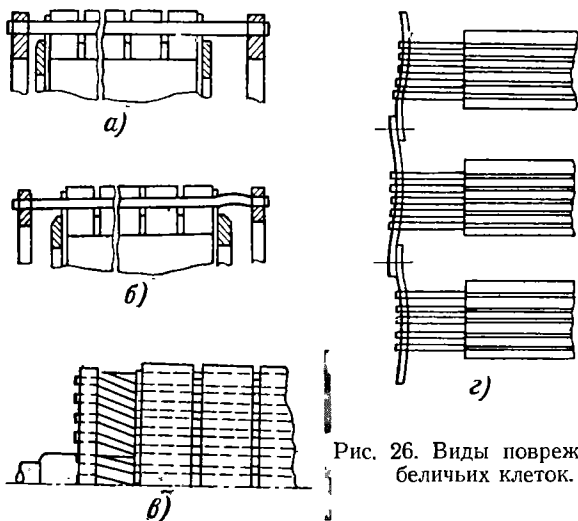


Рис. 26. Виды повреждений беличьих клеток.

явление можно наблюдать в пусковых клетках синхронных двигателей, не имеющих торцевого бандажного кольца (рис. 26, в);

наличие цветов побежалости на короткозамыкающих кольцах в местах паяных соединений со стержнями, подгары в местах соединений, подгары болтов, соединяющих короткозамыкающие сегменты пусковых клеток синхронных двигателей.

К менее характерным, отдельным повреждениям короткозамкнутых обмоток можно отнести: выпучивание стержней прямоугольного сечения через шлиц паза ротора (наблюдается у некоторых асинхронных двигателей иностранных фирм), разрушение в виде мелкой крошки стальных уплотняющих прокладок в пазах короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, в результате вибрации стержней в пазах с повышенной частотой и т. п.

Способы обнаружения неисправностей. Все описанные выше виды повреждений беличьих клеток, за исключением трещин и обрывов стержней в пазовой части, могут быть обнаружены при внимательном осмотре короткозамкнутой обмотки в период профилактического ремонта. Это так называемые начальные повреждения, которые еще не привели к обрыву короткозамкнутой обмотки. Эти повреждения практически не нарушают нормальной работы двигателя и поэтому в процессе работы двигателя ничем себя не обнаруживают.

С особой тщательностью следует производить проверку наличия начальных трещин на выступающих концах стержней, используя при этом все способы обнаружения трещин в металле: оптический (с применением увеличительных стекол), химический (протравливание подозрительных мест реактивами или мелом с керосином), электромагнитный (специальными приборами).

Весьма тщательно следует осмотреть также состояние паяных соединений стержней с кольцами, обращая внимание на самые незначительные изменения мест пайки.

Обрыв одного или двух стержней в процессе работы двигателя не всегда может быть сразу обнаружен эксплуатационным персоналом, так как внешние изменения в работе двигателя могут быть незначительными, в особенности у тихоходных двигателей и двигателей, работающих с запасом мощности. При обрыве даже одного стержня нарушается нормальная работа короткозамкнутой обмотки и, как правило, после сравнительно непродолжительной работы двигателя влечет за собой обрыв других стержней, что приводит к аварийному выходу двигателя из строя.

На наличие в работающей беличьей клетке оборванных стержней указывают следующие признаки:

усиление вибрации двигателя как следствие возникающей асимметрии магнитных потоков ротора, приводящей к появлению дополнительных сил одностороннего магнитного притяжения, может быть обнаружено приборами — виброметром или индикатором;

появление шума с тоном, не характерным для нормальной работы данного двигателя, а иногда появление прерывистого тона. Появление дополнительного шума также является следствием усилившейся вибрации и нарушения симметрии магнитных потоков;

затяжка или увеличение времени пуска. В некоторых случаях в установках с тяжелым пуском двигатель может вообще не развить номинальной скорости вращения или даже не тронуться с места, если оборвано несколько стержней.

Но, как уже указывалось выше, очень часто при обрыве одного — двух стержней перечисленные признаки могут быть настолько не явны, что практически по ним обнаружить дефект беличьей клетки чрезвычайно затруднительно. Поэтому при профилактических осмотрах

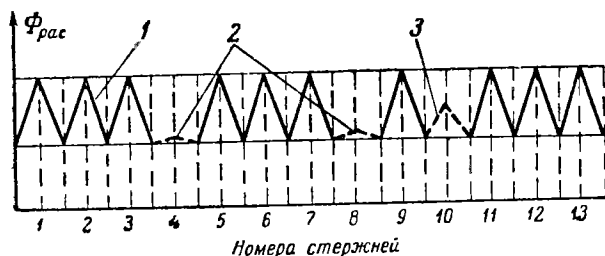


Рис. 27. Схема изменения магнитного потока рассеяния по развертке окружности ротора.

1 — неповрежденный стержень; 2 — оборванный стержень; 3 — трещина стержня.

двигателей, в особенности работающих в ответственных установках, следует производить проверку целостности стержней специальными способами. Кроме того, если даже и удалось по перечисленным выше признакам установить факт наличия обрыва в беличьей клетке, надо еще определить и паз, в котором заложен оборванный стержень.

Ниже приводится несколько способов обнаружения оборванных или имеющих трещину в пазовой части стержней беличьих клеток.

Способ, основанный на измерении изменения магнитного потока рассеяния. При питании стержней беличьей клетки переменным током от постороннего источника вокруг стержней образуется магнитное поле рассеяния. Причем над стержнями, обтекаемыми током, величина магнитного потока будет иметь максимальное значение, а между пазами и над оборванными стержнями — минимальное.

Схема изменения магнитного потока рассеяния показана на рис. 27 на развертке ротора. Как видно из рисунка, при неполном обрыве стержня измеренная вели-

чина магнитного потока рассеяния над этим стержнем будет иметь какое-то промежуточное между максимальным и минимальным значение.

Измерение производится следующим образом:

1) к короткозамыкающим кольцам ротора подводится переменный ток от постороннего источника. Для проверки исправности ротора требуется величина тока в пределах от 10 до 30 а, в качестве источника питания лучше всего использовать понижающий трансформатор 220—127/12 в.

Для роторов малых диаметров подвод питания можно осуществлять к точкам короткозамыкающих колец, расположенным по диагонали бочки ротора, и измерять величину магнитного потока рассеяния вокруг всей бочки ротора без переноса питания в другие точки.

Для роторов больших диаметров целесообразно подводить питание к точкам колец, расположенным против одного из стержней, измеряя при этом величину потока рассеяния пяти — шести стержней до и после места присоединения питания. Затем перенести питание на десять — двенадцать стержней и т. д.;

2) величины магнитного потока рассеяния измеряют по всей окружности бочки ротора над стержнями и между пазами. Для проверки исправности стержней ротора не требуется знание абсолютного значения величины магнитного потока рассеяния, достаточно определить ее относительное изменение. Измерение производится прибором типа ВАФ-85 (вольт-ампер-фазоиндикатор). При этом тумблер «величина — фаза» прибора типа ВАФ-85 ставится в положение «величина», переключатель пределов на 1 или 5 а и присоединяется клещевая приставка. В зазор клещевой приставки вставляется какой-либо неферромагнитный предмет толщиной 7 мм. Клещи плоскостью своего разъема устанавливаются параллельно стержню непосредственно на бочку ротора и передвигаются по образующей всей бочки ротора. Фиксируется показание прибора над каждым стержнем и между пазами. При измерении обе щеки клещевой приставки должны одинаково плотно лежать на бочке ротора;

3) по измеренным величинам магнитного потока рассеяния судят об исправности стержней ротора и определяют места заложения поврежденных стержней, подобно тому как это сделано на рис. 27.

Описанный способ применим для роторов, имеющих различную форму паза (открытый, полузакрытый, закрытый, глубокий, бутылочный и т. п.), и дает возможность достаточно точно определить наличие и место заложения поврежденных стержней.

Затрата времени на проверку ротора, включая и время сборки схемы, не превышает 25—30 мин.

Способ трех амперметров. В три фазы статора включают амперметры, ротор затормаживают, а в статор подают напряжение, которое равно $1/4—1/5$ номинального. Затем ротор медленно проворачивают и определяют максимальное и минимальное значения тока статора по установленным амперметрам. При исправном роторе величина тока в статоре во всех положениях ротора будет одинаковой, а при обрыве или плохом контакте будет изменяться в зависимости от положения ротора.

Критерием годности ротора является соотношение токов:

$$\frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}}} 100\%.$$

Ротор считается годным, если это соотношение не превышает 3%.

Для нахождения места заложения поврежденных стержней ротор несколько выдвигают из статора и надежно предохраняют от проворачивания, в обмотку статора подают напряжение, равное $1/4—1/5$ номинального значения.

На каждый паз выступающей части ротора поочередно накладывают тонкую стальную пластину, перекрывающую два зубца ротора. При нахождении пластинки над пазами, в которых нет стержней с обрывом, она будет притягиваться и дребезжать. Как только пластинка перекроет паз с поврежденным стержнем, притяжение и дребезжание станут значительно слабее или вовсе исчезнут.

Во избежание перегрева обмоток опыт следует производить достаточно быстро.

Этот способ интересен тем, что не требует специальных приборов и поэтому доступен в любых эксплуатационных условиях.

Следует заметить, что проведение измерений по первой части данного способа требует строгого центрирования ротора относительно статора. Неравномерность

зазора делает показания приборов сомнительными. При наличии нескольких разорванных стержней, которые расположены симметрично по окружности ротора (вообще-то случай весьма редкий), разность показаний амперметров может оказаться незначительной, хотя ротор совершенно не пригоден к работе.

Учитывая последние соображения, рекомендуется не ограничиваться проверкой методом трех амперметров, но даже в случае получения благоприятных результатов произвести проверку на притяжение пластинки.

Магнитная порошковая дефектоскопия. Сущность способа магнитной порошковой дефектоскопии заключается в следующем: от понижающего трансформатора к короткозамыкающим кольцам ротора подводится напряжение 1,5—2,5 в. Изменяя первичное напряжение, устанавливают во вторичной цепи ток 300—500 а. Вторичная обмотка трансформатора, соединительные провода и контактные поверхности на короткозамыкающих кольцах ротора должны быть рассчитаны на такой ток. Ток при прохождении по параллельно включенным стержням роторной клетки создаст вокруг каждого стержня магнитное поле. Ротор обертывают плотным листом белой бумаги, который покрывают тонким слоем стальных опилок. Они расположатся плотной линией вдоль целых стержней и менее плотно вдоль стержней, имеющих разрывы.

Существует еще несколько способов обнаружения поврежденных стержней беличьих клеток (с аппаратами трансформаторного типа, аппаратами, работающими по мостовой схеме, ультразвуковыми установками и др.), более подробно с некоторыми из них можно ознакомиться в [Л. 5].

Основные причины повреждения беличьих клеток. Причиной повреждения беличьих клеток являются: деформация; разрывы от механических перенапряжений, возникающих в материале стержней, колец и в местах соединений в результате действия центробежных сил, сил инерции короткозамыкающих колец и вибрации стержней, а также в результате температурных факторов от действия проходящего тока.

В результате образования электрической дуги под действием проходящего тока происходят распайки и оплавления мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами.

Повреждения короткозамкнутых обмоток от действия центробежных сил, приводящие к обрыву стержней и колец, — явление, нечастое, так как эти силы и механические напряжения в материале стержней и колец от их действия могут быть рассчитаны конструктором с достаточной точностью. На основании произведенного расчета выбирается конструкция, материал и размеры стержней и колец.

Особо следует обратить внимание на прочность короткозамыкающих колец в короткозамкнутых асинхронных двигателях, реконструируемых с переводом на новую (повышенную) скорость вращения, когда ограничиваются

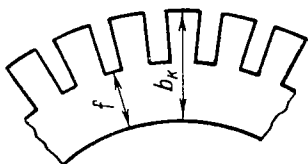


Рис. 28. К расчету механических напряжений в короткозамыкающем кольце.

лишь заменой статорной обмотки, а беличью клетку оставляют без изменения, и в короткозамкнутых асинхронных двигателях, переделываемых из двигателей с контактными кольцами, силами ремонтного персонала на местах установки двигателей.

Для расчета механических напряжений, возникающих в короткозамыкающих кольцах под действием центробежных сил, пользуются формулой

$$\sigma = 2,8 \cdot 10^{-8} D_k n_c^2 \gamma, \text{ кг/см}^2, \quad (14)$$

где D_k — средний диаметр кольца, м;

n_c — синхронная скорость вращения двигателя, об/мин;

γ — удельный вес материала кольца, г/см³.

Формула (14) действительна для сплошных колец, не ослабленных пазами под стержни. Если для кольца, имеющего пазы, принять, что на растяжение работает лишь мостик f (рис. 28), то механическое напряжение в нем

$$\sigma_f = \sigma \frac{b_k}{f}, \text{ кг/см}^2,$$

где b_k — радиальная толщина кольца, мм;

f — высота мостика, мм.

При конструировании клеток высота мостика f должна быть выбрана таким образом, чтобы механические напряжения в нем не превышали:

220 кг/см² — для меди марок М2 и М3,

800 кг/см² — для стали маркн Ст. 3.

Явление скручивания, проворота короткозамыкающих колец, сопровождающееся изгибом стержней (рис. 26, в), может иметь место в высокоскоростных двигателях

с массивными короткозамыкающими кольцами и насаженными на них стальными бандажными кольцами. В эксплуатации такие случаи наблюдались у большого количества асинхронных двигателей типа КМО350-2, $n=2980$ об/мин.

Объяснить это явление можно следующим образом. В процессе разгона двигателя под нагрузкой, а также в период рабочего режима при номинальной скорости вращения в момент резко увеличивающейся нагрузки на валу двигателя бочка ротора с заложенными в ней стержнями беличьей клетки подвергается динамическим силам резкого торможения. Это торможение на короткозамыкающие кольца передается через выступающие концы стержней. Таким образом, если сила инерции вращающихся с большой скоростью массивных колец будет больше сопротивления изгибу концов стержней, то кольцо как бы повернется относительно бочки ротора и изогнет выступающие концы стержней в месте их выхода из бочки. При сравнительно коротких выступающих концах стержней их жесткость и сопротивление изгибу увеличиваются. В этом случае может произойти отрыв концов стержней от кольца.

Выше упоминалось о явлении вибрации стержней беличьей клетки с повышенной частотой (для двигателей, работающих на промышленной частоте 50 гц, частота вибрации стержней около 100 гц). Это явление обусловлено совместными факторами вращения ротора и действия магнитного поля двигателя на проводник с током. Естественно, вибрации подвержены стержни, которые слишком свободно размещены в пазах ротора. В результате вибрации возможно выкрашивание металлических уплотняющих прокладок в пазах короткозамкнутых роторов, переделанных из роторов с контактными кольцами, а также возможен отрыв от короткозамыкающих колец в результате усталостных перенапряжений материала стержней в сечении, примыкающем к кольцу.

Главными факторами повреждения короткозамкнутых клеток следует считать деформации и разрывы деталей клеток от механических перенапряжений в результате действия высоких температурных нагревов стержней и колец в процессе пуска двигателя. Как показала эксплуатация синхронных и асинхронных двигателей, на промышленных предприятиях и электростанциях 80% всех повреждений короткозамкнутых обмоток являются следствием этого фактора. Причем наиболее тяжелым в этом отношении является период пуска двигателя, когда происходит очень быстрый и неравномерный нагрев клетки. Температура в отдельных частях ее у некоторых двигателей достигает 400—500° С.

Положение усугубляется еще и тем, что существующие методы расчета пусковых перегревов короткозамкнутых обмоток, применяемые при проектировании двигателей, в целом ряде случаев не дают правильной картины роста и распределения температур в процессе пуска. Кроме того, конструктору не всегда известен весь перечень производственных механизмов, с которыми должен работать данный двигатель. Например, двигатели, рассчитанные на легкий пуск, иногда работают в установках с тяжелым пуском. Известны случаи, когда на некоторых цементных заводах мощные синхронные двигатели с расчетным начальным пусковым моментом $M_{н.п}=0,4 M_n$, рассчитанные на легкий пуск при холостом ходе производственного механизма, работали приводами цементных мельниц и по условиям производства часто должны были запускаться при полной нагрузке. В результате этого наблюдается регулярный выход из строя пусковых клеток.

Особенно неблагоприятным режимом для короткозамкнутой обмотки (и для обмотки статора двигателя) являются повторные пуски из горячего состояния. В этом случае перегревы обмоток достигают наивысших значений, в особенности в двигателях с тяжелым пуском. В эксплуатации отмечены различные виды повреждений беличьих клеток в результате повышенных перегревов в зависимости от типа короткозамкнутой обмотки и ее конструктивно-технологического исполнения. Так, у двигателей с глубоким пазом лопаются или вырываются из колец стержни или происходит поломка самих колец. При пуске глубокопазных двигателей ток в роторных стержнях оттесняется к открытой стороне паза. Неравномерное распределение тока по сечению стержней вызывает их неравномерный нагрев. Перепады температуры по высоте стержня тем выше, чем больше его высота и пусковая плотность тока. У стержней высотой 35—40 мм при начальной пусковой плотности тока порядка 40—48 а/мм² разность температуры между верхним и нижним слоями стержня может достигнуть при пуске 100—150° С.

Если бы стержень свободно лежал в пазу, то при неравномерном его нагреве более горячие верхние слои удлинились бы больше, чем нижние, при этом стержень изогнулся бы.

Если стержень сидит в пазу плотно, то изогнуться он не может, вследствие чего в нем образуются механические напряжения: верхние слои оказываются сжатыми, а нижние растянутыми. При этом наибольшее напряжение возникает в верхних слоях стержней, в результате чего нередко в этой зоне обнаруживаются трещины.

Если стержни сидят в пазах не плотно и под действием неравномерного нагрева могут несколько изогнуться, то наибольшие механические напряжения возникают в концах стержней, т. е. в местах сопряжения с короткозамыкающими кольцами. В результате этого стержни вырываются из колец или происходит поломка последних.

На предприятиях при эксплуатации пытаются иногда предотвратить разрывы колец путем увеличения их сечения или надеванием на них стальных колец. Однако это ведет к тому, что наиболее слабым местом оказываются уже не кольца, а стержни. Поэтому после усиления колец обычно начинают ломаться стержни.

В асинхронных двигателях деформация беличьих клеток при неравномерном температурном удлинении отдельных стержней является результатом неодинаковой плотности посадки стержней в различных пазах. Так, смещение всей клетки (рис. 26,а) происходит при слишком свободной посадке стержней в большинстве пазов, когда многократные удлинения стержней в процессе нагрева и сокращения в процессе остывания не регулируются силой трения стержней о стенки паза.

Горбообразные выгибы концов стержней (рис. 26,б) имеют место в тех случаях, когда отдельные стержни слишком туго сидят в пазах, причем не по всей длине бочки ротора, а только у одного из ее торцов; изгиб конца стержня при этом наблюдается с противоположного торца бочки, так как основное удлинение стержня происходит именно в этом направлении. Такие стержни испытывают усиленные напряжения в месте соединения с короткозамыкающими кольцами с обеих сторон: на стороне горбообразного изгиба — на излом в месте соединения с кольцом, на противоположной стороне — на отрыв от кольца.

Слишком тугая посадка всех стержней по всей длине паза также является технологическим дефектом и в двигателях с тяжелым пуском неизбежно приведет к отрыву стержней от кольца, так как при этом все-таки окажутся стержни с более слабой и более тугой посадкой, причем вполне вероятны случаи заклиновки стержней с разных сторон бочки ротора, что следует считать особенно неблагоприятным.

В пусковых клетках синхронных двигателей, кроме перечисленных технологических факторов, способных привести к повреждению беличьей клетки, действует еще и специфический фактор неравномерного распределения тока в стержнях каждого полюса [в крайних стержнях ток больше, чем в средних, что может привести к изгибу кольца (рис. 26,г) или к обрыву стержней].

Распайки и оплавления мест соединения стержней с короткозамыкающими кольцами, как правило, не является следствием конструктивных дефектов беличьих

клеток, так как в подавляющем большинстве конструкций расчетная площадь контакта стержня с короткозамыкающим кольцом или сегментом вполне достаточна и должна обеспечивать нормальную работу места соединения при прохождении по нему пусковых токов. Причиной распаяк и оплавлений, как правило, является нарушение технологии пайки: неправильная подготовка места соединения под пайку, не обеспечивающая полного заполнения припоем зазора между стержнем и пазом под стержень в короткозамыкающем кольце; неудачный выбор припоев и флюсов; неправильный выбор средств разогрева при пайке и т. п.

Рекомендации по пайке беличьих клеток будут даны в разд. 4.

Следует отметить, что результатом нарушения технологии пайки могут быть и обрывы стержней в месте входа в короткозамыкающее кольцо — это происходит в случае пережога концов стержней при завышении температуры разогрева при пайке.

На снижение механической прочности и обрывы концов стержней в указанных местах влияет также выбор припоя. Так, в соединениях I категории, испытывающих повышенные механические напряжения при пусковом и рабочем режимах, рекомендуется применять серебряные припой марок ПСР-25, ПСР-45 и реже ПСР-15. Ремонтники-эксплуатационники часто задают такой вопрос. Почему для указанных соединений (I категории) не рекомендуется применять медно-фосфористый припой, который весьма технологичен, хорошо заполняет зазор между стержнем и кольцом, надежно сцепляет материалы стержня и кольца и обеспечивает монолитную структуру места соединения. Случаи распайки беличьих клеток или оплавления мест соединения, запаянных медно-фосфористым припоем, — явление чрезвычайно редкое. Все это вполне справедливо. Но неприятность заключается в том, что даже при полном соблюдении технологии при пайке медно-фосфористым припоем происходит фосфоризация довольно толстого слоя концов стержней в месте, примыкающем к кольцу, в результате резко снижается механическая прочность стержней в этих местах.

Из сказанного выше о конструктивных и технологических дефектах беличьих клеток, способствующих их повреждению в процессе эксплуатации, конечно, не следует, что все двигатели, имеющие какие-либо из этих дефектов, обязательно должны выйти из строя. Повреждаются только те работающие в тяжелых механических и тепловых режимах короткозамкнутые обмотки, в которых указанные дефекты наиболее ярко выражены. Большинство же короткозамкнутых обмоток работает нормально без повреждений довольно длительные сроки.

При определении причин повреждения беличьих клеток следует иметь в виду, что данное повреждение могло явиться результатом совместного действия основных факторов. В особенности это касается наиболее частого вида повреждения — обрыва стержней в месте присоединения к короткозамыкающему кольцу.

После ознакомления с анализом возможных причин повреждения короткозамкнутых клеток становится ясным, как важно перед тем, как приступить к ремонту клетки, установить эти причины.

4. РЕМОНТ БЕЛИЧЬИХ КЛЕТОК

Виды ремонта. Ремонт короткозамкнутых клеток на месте эксплуатации на предприятиях в зависимости от причин и степени повреждения, а также с учетом производственных условий, связанных с восстановлением и вводом в эксплуатацию поврежденного двигателя, может быть либо частичным, либо с полной заменой беличьей клетки.

Невозможно дать исчерпывающие рекомендации для определения объема ремонта для всех случаев повреждения беличьих клеток, ибо это зависит от многих условий. Но во всяком случае решение о частичном ремонте следует принимать лишь в тех случаях, когда повреждение явилось результатом отдельных дефектов, не характерных для узлов и деталей всей клетки. Например, распайки отдельных мест соединения стержней с короткозамыкающим кольцом вследствие некачественной пайки в этих местах; деформация или обрыв одного-двух стержней, если обнаружена слишком слабая или слишком тугая посадка их в пазах ротора; замена поврежденных деталей, соединяющих короткозамыкающие сегменты в пусковых клетках синхронных двигателей, и др. Ниже будут приведены проверенные ремонтной практикой способы частичного ремонта отдельных двигателей.

При эксплуатации двигателей часто приходится прибегать к полной замене беличьей клетки, тем более, что в условиях современного оснащения ремонтных цехов предприятий изготовление новых стержней простых профилей (круглых, прямоугольных) и короткозамыкающих колец не представляет особой трудности. В связи с этим необходимо дать общие рекомендации по основным операциям изготовления короткозамкнутых клеток, к каковым следует отнести: изготовление стержней, изго-

товление короткозамыкающих колец, пайка мест соединений стержней с короткозамыкающими кольцами.

Изготовление стержней. В разд. 2 были приведены основные материалы, применяемые для изготовления стержней и колец беличьих клеток как для пусковых, так и для рабочих обмоток. В зависимости от требуемых размеров изготавливают стержни круглого или прямоугольного профиля соответственно из прутковых или полосовых, листовых и шинных заготовок. Стержни бутылочного, трапецидального профиля изготавливать на предприятиях слишком затруднительно. При ремонте

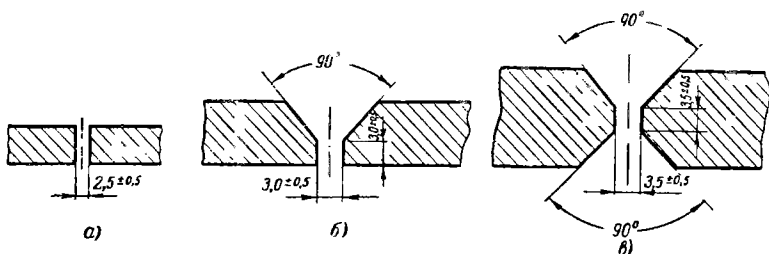


Рис. 29. Механическая обработка заготовок короткозамыкающих колец под сварку.

а — заготовки толщиной до 6 мм; *б* — то же от 6 до 12 мм; *в* — то же больше 12 мм.

комплект таких стержней по соответствующему номеру профиля (табл. 8) лучше всего получить непосредственно с завода — изготовителя двигателя.

Изготовление короткозамыкающих колец. В соответствии с установленными категориями прочности для обмоток с окружной скоростью выше 50 м/сек используют цельные медные или латунные кольца, изготовленные из прокованных заготовок. И только кольца диаметром больше 800 мм и толщиной до 20 мм допускается (после проведения соответствующего расчета на прочность) изготовить сварными с одним или двумя стыками.

Для короткозамкнутых обмоток с соединениями II категории прочности (испытывающих более низкие механические нагрузки) допускается использование сварных медных и латунных колец, имеющих четыре, а иногда и более стыков.

Для того чтобы произвести надежную сварку частей короткозамыкающего кольца, необходимо правиль-

но обработать кромки заготовок под сварку. На рис. 29 показана обработка кромок в зависимости от толщины заготовок.

Таблица 10

Материал заготовки	Присадочная или сварочная проволока или прутки		Флюс
	Материал	Марка	
Медь	Медь	М1 или МЗС (ГОСТ 859-41)	Бура техническая обезвоженная (ГОСТ 8429-57)
Латунь	Латунь	ЛОК 59-1-0,3 (СТУ30 533-64) Л62 (ГОСТ 1019-47)	Натрий хлористый (ГОСТ 4233-48) Кислота борная (ГОСТ 2629-44)

Соединение частей короткозамыкающего кольца производится газовой сваркой. Присадочные материалы и флюсы для газовой сварки следует выбирать по табл. 10.

Из приведенных в табл. 10 марок присадочной проволоки для сварки латуни предпочтительнее проволока ЛОК59-1-0,3, которая способствует повышению прочностных свойств сварных соединений за счет минимального выгорания цинка.

Таблица 11

Толщина свариваемых заготовок колец, мм	Диаметр присадочной сварной проволоки или прутков, мм
До 4	3
5—8	5
9—12	6
13—20	8
Свыше 20	8—10

Диаметр присадочной проволоки или прутков в зависимости от толщины свариваемых заготовок колец рекомендуется выбирать по табл. 11.

Непосредственно перед сваркой заготовки колец и присадочные прутки подвергают обезжириванию и травлению. Обезжиривание может быть местным, когда обезжириванию подвергаются только свариваемые кромки заготовок и непосредственно прилегающие к ним участки шириной 40—50 мм, и полным, когда детали целиком промываются в специальном баке, заполненном обезжиривающим составом.

Для обезжиривания применяется один из следующих растворителей: бензин авиационный марки Б-70; бензин-

растворитель для лакокрасочной промышленности; уайт-спирит (ГОСТ 3134-52); ацетон технический.

Местное обезжиривание производится смоченной в растворителе чистой ветошью. Участок, подлежащий обезжириванию, следует протереть не менее 3—4 раз. Перед обезжириванием необходимо протереть детали чистой ветошью для снятия грязи.

После обезжиривания свариваемые кромки подвергают травлению. Для травления наиболее часто используют концентрированную азотную кислоту с содержанием 250—350 г/л (ГОСТ 701-58). Температура раствора комнатная, а время травления 15—30 сек; натрий хлористый (ГОСТ 4223-48) с содержанием 1,5—2,5 г/л, температура раствора комнатная, а время травления 3—10 мин.

После травления заготовки колец и присадочные материалы тщательно промывают в горячей воде, а затем протирают волосяными щетками и просушивают в сушильном шкафу при температуре 120—130° С. Сушку можно производить и горячим воздухом (воздуходувкой), очищенным от влаги и пыли.

Сварку следует производить не позднее, чем через 8 ч после травления. В противном случае перед сваркой необходимо произвести механическую зачистку свариваемых кромок стальной щеткой, напильником или стеклянной шкуркой. Не рекомендуется производить очистку с помощью абразивов и наждачной бумаги. После механической зачистки необходимо повторить травление свариваемых кромок.

Сварку выполняют ацетилено-кислородным пламенем, применяя присадочную проволоку и флюс согласно табл. 10 и 11. Для получения надежного соединения при изготовлении сварных короткозамыкающих колец рекомендуется придерживаться следующих выработанных практикой правил:

1. Сварку медных или латунных заготовок толщиной от 15 до 25 мм с одним стыком в кольце производят горелкой мощностью 2500 л ацетилена в 1 ч. При меньшей толщине заготовок мощность горелки берут из расчета 200 л ацетилена в 1 ч на 1 мм толщины для заготовок из меди и 130 л в 1 ч для заготовок из латуни. Сварку заготовок толщиной более 25 мм лучше производить сразу двумя горелками, одну из которых используют для прогрева и поддержания температуры массы

заготовки, а вторую для сварки. Кольца с двумя стыками варят двумя горелками сразу в двух стыках.

2. В стыке заготовок необходимо выдержать зазор (рис. 29). Для этой цели внутрь заготовки вставляют распорную планку, которую следует удалять после заварки разделки с одной стороны.

3. Заполнение разделки присадочным металлом начинают сразу же после оплавления кромок и доводят до получения выпуклого шва.

После заварки одной стороны разделки производят подрубку, зачистку и разварку корня первого шва. Затем аналогичным путем заполняют присадочным металлом вторую и боковые стороны разделки.

Увеличение толщины короткозамыкающего кольца после сварки за счет усиления сварочного шва не должно превышать 20% толщины свариваемой заготовки.

4. После сварки медные кольца проковывают при температуре не ниже 650°С и охлаждают водой. Ковку латунных колец производят при температуре, не превышающей 500°С. Проковку швов производят стальным молотком весом 300 г с круглым бойком.

5. После проковки выполняют отжиг сварных швов путем нагрева колец горелками до температуры 550—600°С и охлаждение. Медные кольца охлаждают быстро поливом водой, а латунные — медленно при комнатной температуре.

6. После охлаждения кольцо обрабатывают по внешнему и внутреннему диаметрам и по плоскостям.

Качество сварки проверяют обычными методами, применяемыми при сварочных работах. Особо тщательно внешним осмотром проверяют швы после проковки и после механической обработки, для этого применяют лупы с многократным увеличением.

В отдельных случаях при ремонте изготавливают наплавленные медные короткозамыкающие кольца (рис. 20,2). Изготовление наплавленных колец значительно проще, чем колец с нарезными пазами, и производится в следующей последовательности:

1. Заготавливают полосу толщиной 4—5 мм из шинной или листовой меди шириной, несколько большей, чем осевая толщина кольца, и длиной, равной длине окружности кольца (по внутреннему диаметру).

2. Согнутую в кольцо полосу-заготовку вставляют под концы стержней беличьей клетки.

Припой	Марка	Химический	
		Серебро	Медь
Серебряный	ПСР-45	$45 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$
	ПСР-25	$25 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$
Медно-фосфористый	ПМФ-7	—	Остальное
Медно-цинковый	ЛОК 59-1-0,3	—	$59 \pm 0,1$
	Л62	—	$62 \pm 1,5$

3. На кольцо наплавляют медь так, чтобы были заполнены все промежутки между концами стержней и чтобы последние были покрыты сверху медью на 3—5 мм.

В качестве присадочного материала применяют отожженную медную проволоку диаметром 3—4 мм, скрученную вдвое. Расплавление проволоки и нагрев концов стержней производят газовой горелкой № 5 или 6.

4. Проточку колец производят на токарном станке.

Пайка соединений роторных стержней с короткозамыкающими кольцами. Пайка соединений стержней с кольцами является наиболее ответственной при ремонте операцией. Несоблюдение технологии пайки или неправильный выбор припоев и флюсов для разного вида соединений снижает надежность паяного соединения и часто является причиной выхода двигателя из строя.

Основные типы припоев, применяемых при пайке медных или латунных стержней с медными или латунными кольцами, приведены в табл. 12.

Для двигателей, работающих в тяжелых условиях пуска, когда имеют место большие температурные напряжения в месте соединения стержня с короткозамыкающим кольцом, рекомендуется применять серебряные припои, а также комбинированную пайку медно-цинковым и медно-фосфористым припоем.

Для пайки беличьих клеток двигателей со сравнительно легкими условиями пуска, в особенности если и стержни и кольца медные, следует применять медно-фосфористый припой.

Таблица 12

состав, %					Температура расплавления, °С
Фосфор	Цинк	Олово	Кремний	Всего примесей, не более	
—	$25 \pm 0,5$	—	—	0,5	725
—	$35 \pm 1,0$	—	—	1,0	765
$7,5 \pm 0,5$	—	—	—	1,0	710
—	Остальное	0,7—1,1	0,2—0,4	0,3	890
—		—	—	0,5	905

В последнее время в целях экономии серебра проверено на практике и допускается применение припоя марки МФ-3 с прибавкой 3% серебра или 8% припоя марки ПСР-45 для пайки соединений I категории. В качестве флюса при этом используется бура.

Для всех приведенных в табл. 12 припоев и вариантов соединения медных и латунных стержней с медными и латунными кольцами в качестве флюса применяют буру. Исключение составляет только пайка медно-фосфористым припоем медных стержней с медными кольцами — в этом случае никакого флюса не требуется.

При пайке меди серебряными припоями иногда пользуются флюсом № 209. Несмотря на то что флюс этот весьма технологичен, применение его является нежелательным, так как при этом образуются гигроскопичные шлаки, которые подлежат удалению путем кипячения соединения в воде. В противном случае применение флюса № 209 может привести к коррозионному разрушению обмоток.

Концы стержней короткозамкнутой обмотки, отверстия в кольцах под круглые стержни и пазы в кольцах под прямоугольные стержни необходимо подготовить к пайке. На рис. 30 показана механическая обработка

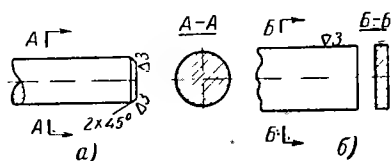


Рис. 30. Механическая обработка концов стержней под пайку.

а - круглые стержни; б - прямоугольные стержни.

концов круглых и прямоугольных стержней. Концы стержней бутылочной и трапецидальной форм обрабатывают как круглые и прямоугольные соответственно.

Механическая обработка под пайку короткозамыкающих колец показана на рис. 31, а взаиморасположение собранных для пайки элементов короткозамкнутой обмотки — на рис. 32. Зазоры в соединениях а (рис. 32) при пайке серебряными припоями должны быть 0,1—0,2 мм, а для медно-фосфористого припоя марки ПМФ-7 — 0,2—0,25 мм.

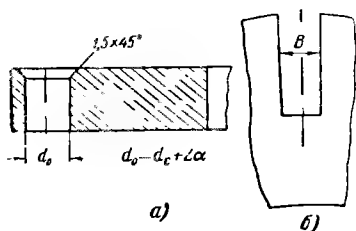


Рис. 31. Механическая обработка пазов в короткозамыкающих кольцах под пайку.

а — для круглых концов стержней;
б — то же для прямоугольных;
b — толщина стержня; $B = b + 2\alpha$.

Непосредственно перед пайкой стержни и кольца должны быть подвергнуты местному или полному обезжириванию и травлению точно так же, как это было описано выше.

Пайку роторных стержней с короткозамыкающими кольцами осуществляют газовой и электроконтактной пайкой.

Электроконтактная пайка основана на контактном электродуговым нагреве мест пайки и интересна тем, что дает возможность максимально механизировать про-

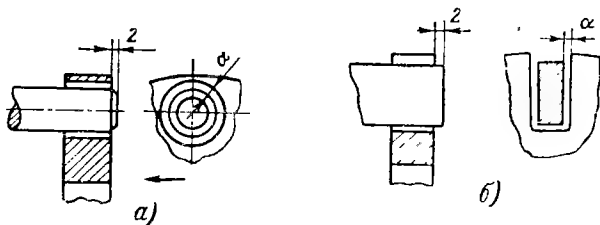


Рис. 32. Взаиморасположение собранных для пайки элементов беличьей клетки.

а — круглые стержни; б — прямоугольные стержни.

цесс пайки, повысить производительность труда при хорошем качестве пайки. Но так как электроконтактная пайка требует специального довольно сложного оборудования, пользоваться ей в условиях ремонта двигателей на местах эксплуатации приходится редко.

Наиболее распространенной при ремонте является газовая пайка. Пайку выполняют ацетилено-кислородным пламенем горелкой мощностью около 2000 л ацетилена в 1 ч. Для подогрева и поддержания температуры массивных деталей используют отдельную горелку.

Для получения надежного паяного соединения рекомендуется придерживаться следующих выработанных практикой правил:

1. Ротор под пайку устанавливают горизонтально при стержнях (концах) прямоугольного сечения и вертикально при круглых концах стержней. При этом необходимо предусмотреть возможность легкого вращения ротора при переходе от одной пайки к другой.

2. Для обеспечения необходимого зазора между активной сталью и короткозамыкающими кольцами устанавливают дистанционные клинья из нержавеющей стали.

3. После общего разогрева кольца и стержней расплавление припоя производят путем касания им наиболее нагретых мест пайки на наружной поверхности кольца. Не допускается плавление припоя в самом пламени.

4. Горелку с пламенем все время сохраняют в движении. Флюс наносят на спаиваемые поверхности рукой и прутом припоя, погружая разогретый конец прутка в сосуд с флюсом.

5. Пайку стержней по окружности кольца ведут в следующей последовательности: припаивают два диаметрально противоположных стержня, а затем следующую пару стержней, отстоящую от первой на угол 90° , и т. д., пока не будут запаяны все стержни на одном кольце. Затем ротор поворачивают на 180° и повторяют пайку на втором кольце.

6. По окончании пайки всех соединений места пайки зачищают, опиливают или аккуратно срубают наплывы припоя.

7. При комбинированной пайке медно-цинковым и медно-фосфористым припоями пайку начинают со стороны раззенковки на наружной поверхности кольца медно-цинковым припоем (как более тугоплавким). Припой должен полностью заполнить раззенковки. После выполнения пайки со стороны раззенковок поворачивают ротор на 180° и паяют медно-фосфористым припоем

с внутренней стороны короткозамыкающего кольца. Механическая обработка кольца под комбинированную пайку (рис. 34) несколько отличается глубиной зенковки от таковой при пайке припоем одной марки.

8. Проверку качества пайки производят внешним осмотром с лупой 4—6-кратного увеличения. Валики сварочных швов во внешней и внутренней сторонах короткозамыкающего кольца должны быть выполнены так, как показано на рис. 33.

Ремонт беличьей клетки с использованием старых стержней и короткозамыкающих колец. Такой вид ремонта может быть необходим в случаях отрыва одного-

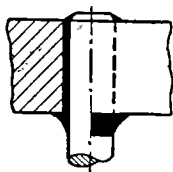


Рис. 33. Образец паяного соединения.

двух стержней от короткозамыкающего кольца или когда принято решение заменить тип припоя в местах соединения, если установлена возможная причина отрыва стержней — неправильный выбор марки припоя. Естественно, оборванные стержни должны быть при этом отремонтированы или заменены новыми.

В практике весьма часто приходится использовать старые стержни и кольца пусковой (верхней) клетки двухклеточных роторов при ремонте рабочей (нижней) клетки, так как для доступа к последней необходимо демонтировать верхнюю клетку (см. рис. 12, ротор типа АТМ).

Для демонтажа ротор устанавливают в вертикальное положение, снимают соединительную муфту и вентилятор с применением обычных приспособлений для стягивания горячо насаженных деталей. Затем производят распайку соединений стержней с верхним короткозамыкающим кольцом. Одновременно происходит прогрев самого кольца до температуры около 800°C , что должно обеспечить свободное его снятие с посадки на нижнее медное кольцо (верхнее стальное короткозамыкающее кольцо в роторах типа АТМ является одновременно и бандажным).

Вертикальное положение ротора обеспечивает отвод тепла при разогреве кольца вверх, тем самым предохраняет от поджогов детали нижней клетки, а в случае одноклеточного ротора — от поджогов активной стали ротора.

Перед нагревом верхнего короткозамыкающего кольца рекомендуется расклинить зазор между верхним и нижним кольцами в шести — восьми местах стальными клиньями. Это предохранит верхнее кольцо от покоробления в процессе нагрева.

После снятия верхнего короткозамыкающего кольца поворачивают ротор на 180° и выполняют те же операции со второй стороны ротора. Положение короткозамыкающих колец относительно пазов ротора маркируют. Перед демонтажем стержней из пазов ротора удаляют с их концов наплывы припоя, которые могут препятствовать выемке при прохождении через пазы. Выбивают стержни очень осторожно, производя удары по концам стержней молотком через деревянные или алюминиевые подбойки во избежание наклепа и расплющивания концов.

Не рекомендуется применять для вытягивания стержней из пазов приспособлений, обеспечивающих значительные усилия, так как стержни могут растянуться и быть непригодными к повторному использованию.

Концы демонтированных стержней и пазы в короткозамыкающих кольцах тщательно очищают от следов старого припоя и обрабатывают под пайку, как это показано на рис. 30 и 31. После необходимого ремонта и подпайки нижней (рабочей) клетки вставляют в пазы ротора стержни верхней клетки. При монтаже стержни должны входить в пазы при легком ударе через деревянную или текстолитовую подбойку молотком весом около 300 г. Если отдельные стержни идут слишком туго, надо либо опилить выступающие за стенки пазов отдельные листы стали, либо обточить сам стержень. Обычно достаточной будет обработка стержня наждачной, а затем стеклянной шкуркой.

Для опиловки пазов ротора применяют напильники длиной, примерно равной длине активной стали ротора, и формой сечения, соответствующей форме паза. Для удобства работы к обоим концам напильника приваривают стальные прутки; опиловку ведут 2 чел. Если отдельные стержни слишком свободно вставляются в пазы, их следует заменить новыми.

Вполне допустимо применение восстановленных путем спайки серебряным припоем марок ПСР-45 и ПСР-70 оборванных стержней. Не следует ремонтировать стержень, имеющий трещины, путем заплавления

последних припоем. Такие стержни рекомендуется распиливать по месту трещины, а затем обработать концы под пайку и спаять заново.

Рекомендуется производить одновременно вставку всех стержней в пазы ротора с постеленной подбойкой диаметрально расположенных стержней. В противном случае, если вставлять стержни по окружности, поочередно вводя каждый стержень на всю длину бочки ротора, возможен сдвиг (проворот) отдельных листов активной стали ротора. Это приведет к тому, что оставшиеся последними незаполненные пазы ротора как бы сузятся и вставить в них стержни будет невозможно.

Пайку стержней с кольцами начинают с внутренней стороны кольца, для чего устанавливают ротор вертикально спаиваемым кольцом вниз. Следует заметить, что после механической обработки концов стержней и пазов короткозамыкающих колец под пайку зазор α

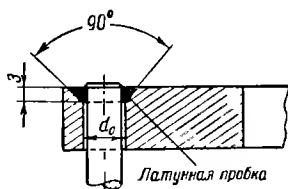


Рис. 34. Пайка с применением «латунной пробки».

(рис. 32) при использовании старых стержней и колец может оказаться несколько большим, чем это рекомендуется для пайки новых деталей, и может достигать до 0,5—0,6 мм.

Для того чтобы припой не утекать через сравнительно большой зазор, в этом случае рекомендуется применять комбинированную пайку с так называемой «латунной пробкой» (рис. 34). Раззенковка внешнего торца короткозамыкающего кольца (делается несколько более глубокой, как для комбинированной пайки) заполняется латунью, имеющей температуру плавления более 900°С. При этом латунь образует как бы пробку на внешней стороне короткозамыкающего кольца. Затем поворачивают ротор на 180° и пропаивают соединения с внутренней стороны, заливая в зазор между стержнями и короткозамыкающим кольцом припой марки ПСР-45, температура плавления которого 725°С.

В данном варианте ремонт нижней клетки производился без демонтажа ее стержней и короткозамыкающих колец, которые в двухклеточных роторах типа АТМ являются одновременно и нажимными, фиксирующими запрессовку активной стали ротора.

Если при ремонте необходимо снять нижние кольца, то предварительно следует зафиксировать пакет активной стали ротора специально изготовленными для этой цели стальными фланцами с четырьмя стягивающими шпильками, как это схематически показано на рис. 35.

Реконструкция двухклеточных роторов типа АТМ на одноклеточное исполнение. Из предыдущего примера ремонта ясно, что для ликвидации даже незначительных повреждений нижней клетки необходимо производить демонтаж верхней клетки, что в значительной степени усложняет ремонт ротора и удлиняет сроки ввода двигателя в эксплуатацию. Кроме того, почти невозможно при профилактических осмотрах обмоток обнаружить дефекты нижней клетки и предупредить аварийный выход двигателя из строя.

Часто двигатели типа АТМ работают с механизмами, запускаемыми без нагрузки или с малой нагрузкой. В этих случаях от двигателя не требуется слишком большого пускового момента, которым обладает двухклеточный двигатель. В то же время рабочие нагрузки могут быть значительными, и в практике эксплуатации имеют место неоднократные повреждения рабочей (нижней) клетки. В этих случаях целесообразно реконструировать двигатель, перейдя на одноклеточное исполнение. Вариант переделки двигателей типа АТМ 1-го габарита (АТМ-500, АТМ-700, АТМ-850) разработан заводом «Электросила» имени С. М. Кирова и состоит из следующих операций:

1) демонтаж верхней клетки, для чего короткозамыкающие кольца срезают на токарном станке и выбивают стержни;

2) распайка и удаление медных стержней нижней клетки;

3) проточка нажимных колец до размеров, указанных на рис. 36,а;

4) изготовление новых деталей — два короткозамыкающих медных кольца (рис. 36,б), 32 медных

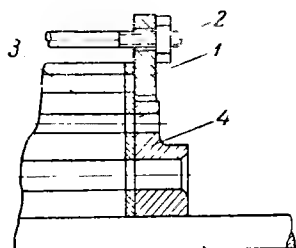


Рис. 35. Установка приспособлений для затяжки пакета активной стали ротора при демонтаже нажимных шайб.

1 — фланец; 2 — стягивающая шпилька; 3 — бочка ротора; 4 — нижнее короткозамыкающее кольцо (нажимная шайба ротора).

стержня верхней клетки диаметром 18 мм длиной 625 мм для двигателей типов АТМ-850; 550 мм — для АТМ-700 и 450 мм — для АТМ-500; два стальных (Ст. 45) бандажных кольца (рис. 36,в); шестнадцать болтов М12

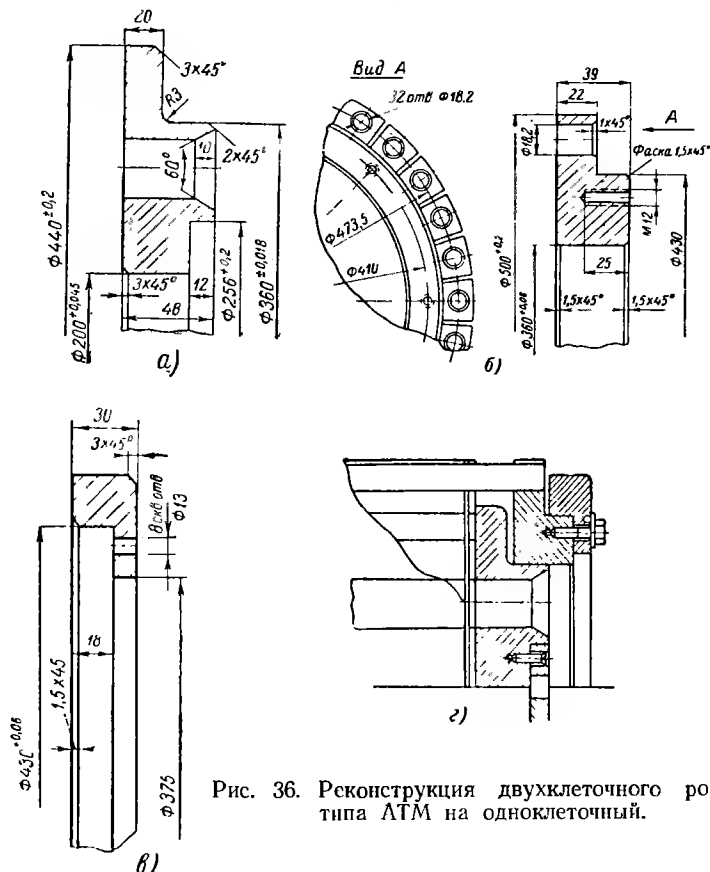


Рис. 36. Реконструкция двухклеточного ротора типа АТМ на одноклеточный.

длиною 30 мм, крепящих бандажные кольца к короткозамыкающим (рис. 36,г);

5) сборка и пайка беличьей клетки (рис. 36,г);

6) проточка бочки ротора до диаметра 494 мм (от 496 мм в двухклеточном исполнении).

Предотвращение поворота короткозамыкающего кольца относительно бочки ротора. Выше приводились причины повреждений такого рода (рис. 26,в). При эксплуатации явление поворота короткозамыкающего кольца

относительно бочки ротора имеет место, например, у асинхронных двигателей типа КАМО350-2. Для предотвращения этого явления у находящихся в эксплуатации двигателей рекомендуется связать каждое короткозамыкающее кольцо с нажимной шайбой с помощью двух диаметрально расположенных шпонок. Шпонки выполняют на специальных пластинах, привариваемых к нажимным плитам ротора. Конструкция узла короткозамыкающих колец асинхронного двигателя типа КАМО350-2 и расположение приваренных шпоночных пластин показаны на рис. 37,а, а на рис. 37,б изображена шпоночная пластина.

Фиксирование короткозамыкающих колец от проворота выполняют в следующей последовательности:

1. В каждом короткозамыкающем кольце 1 выполняют по два диаметрально расположенных шпоночных пазов размером $6,5 \times 16$ мм. При выполнении пазов бандажные кольца 3 рекомендуется снять, для чего вывинчивают предварительно болты 2; следует обратить внимание на строго диаметрально расположенные шпоночные пазы и последующую приварку шпоночных пластин для того, чтобы не нарушать балансировку ротора.

2. Изготавливают четыре шпоночные пластины, размеры каждой шпонки тщательно подгоняют по размерам соответствующего шпоночного паза в короткозамыкающих кольцах.

3. После подгонки шпоночные пластины 4 устанавливают по месту и приваривают к нажимной плите 5 по контуру качественным швом с катетом, равным 5 мм.

Реконструкция беличьей клетки глубокопазных двигателей. Если в эксплуатации наблюдаются частые поломки деталей беличьей клетки глубокопазных двигателей, то следует прибегнуть к радикальному способу передел-

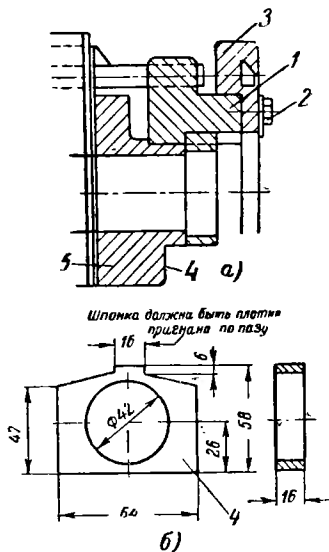


Рис. 37. Установка фиксирующих шпонок в роторе двигателя типа КАМО 350-2.

ки короткозамыкающей обмотки — разделению стержней по высоте на две части, т. е. замене одной беличьей клетки двумя клетками с отдельными короткозамыкающими кольцами. При этом возможны различные варианты исполнения, связанные с условиями работы данного переделываемого двигателя.

Если выполнить обе пары колец из меди без дополнительных стальных прокладок между стержнями, то пусковые и рабочие характеристики двигателя не изменятся. Перепады температуры по высоте паза в пусковом режиме останутся такими же, как при неразделенном стержне, но верхние более горячие стержни смогут свободно расширяться. Вследствие этого механические напряжения в стержнях резко снизятся, что обеспечит нормальную работу двигателя.

Стержни следует заменить двумя стержнями половинной высоты или же стержни наружной клетки можно сделать на 10—20% ниже стержней внутренней клетки. Ширина стержней должна быть равна ширине старого, неразделенного стержня.

Если требуется увеличить пусковой момент переделываемого глубокопазного двигателя, то это можно сделать лишь за счет определенного снижения его полезной мощности в рабочем режиме. Увеличение пускового момента осуществляется за счет введения стальной прокладки между стержнями в пазовой части и выполнения короткозамыкающих колец наружной клетки из стали.

За счет стальной прокладки сечение медных стержней верхней клетки снижается на 12—20%, что и снижает общее сечение стержней короткозамкнутой обмотки при прохождении через них рабочего тока двигателя при нормальной работе. Отсюда соответственно и снижение мощности двигателя.

Конструкция узла короткозамыкающих колец может быть выполнена по одному из видов, показанных на рис. 20.

Указанным способом следует переделывать двигатели, роторные стержни которых имеют высоту не менее 30 мм.

Проворот стального бандажного кольца относительно медного короткозамыкающего кольца. Такой дефект может иметь место в случаях недостаточно плотной посадки бандажного кольца. В последнее время в эксплуатации подобное явление наблюдается у отдельных дви-

гателей типа АД, у которых бандажное кольцо имеет специальный посадочный буртик (см. рис. 16, деталь 4). Для предотвращения проворота завод-изготовитель рекомендует: нагреть и снять стальное бандажное кольцо; на внешнем торце на линии посадки бандажного кольца фрезеровать шесть — восемь симметрично расположенных по окружности полулунок глубиной 2 мм и радиусом около 3 мм; насадить бандажное кольцо и расчеканить медное короткозамыкающее кольцо в местах расположения полулунок.

Устранение дефектов пусковых клеток синхронных двигателей. В основном дефекты пусковых клеток синхронных двигателей вызываются теми же причинами, какие мы отмечали и у короткозамкнутых обмоток асинхронных двигателей, и, следовательно, способы их устранения аналогичны.

Здесь же мы остановимся на повреждении короткозамкнутой обмотки, характерном только для синхронных двигателей. Речь идет о дефектах, представленных на рис. 26, б и г, являющихся следствием повышенных токовых нагрузок крайних на каждом полюсе стержней. Для предотвращения чрезмерных тепловых удлинений крайних стержней, если в практике эксплуатации имели место обрывы, рекомендуется реконструировать пусковую клетку, применив медные стержни с компенсаторами, конструкция которых показана на рис. 24.

Если стержни пусковой клетки изготовлены из бронзы или латуни, то мерой, значительно снижающей механические напряжения, является замена крайних стержней на каждом полюсе медными. Так как электрическое сопротивление меди в несколько раз меньше, чем латуни или бронзы, то нагрев и, следовательно, абсолютная величина удлинения медных стержней будут меньше.

При количестве стержней 10 и более на полюс можно рекомендовать замену медными по два крайних стержня. Незначительное снижение пускового момента вследствие уменьшения активного сопротивления короткозамкнутой обмотки при замене части латунных стержней медными для большинства двигателей не имеет практического значения.

В данной брошюре мы рассмотрели только общие наиболее характерные повреждения беличьих клеток и их способы устранения, а также применяемые виды ремонтов для некоторых конкретных типов двигателей.

В эксплуатации короткозамкнутых обмоток синхронных и асинхронных машин различных типов и кон-

струкций, кроме наиболее характерных, могут встретиться отдельные дефекты и повреждения, присущие только данному конкретному двигателю. Задачей эксплуатационного персонала является своевременная профилактика и обнаружение такого рода дефектов, а главное — необходимо установить вызывающие их причины. Только тогда можно грамотно произвести ремонт двигателя и предотвратить при дальнейшей эксплуатации аварийный выход его из строя.

ЛИТЕРАТУРА

Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А., Сергеев П. С., Проектирование электрических машин, Госэнергоиздат 1956.

2. Иванов Е. А., Электрические машины переменного тока, Вып. II., Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором специального исполнения, Госэнергоиздат, 1961.

3. Оркина Б. Г., Переделка фазных двигателей в короткозамкнутые, Госэнергоиздат, 1949.

4. Виноградов Н. В., Производство электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

5. Сафронов А. В., Методы обнаружения дефектов роторов асинхронных двигателей, Изд. ЦИНТИЭ, 1959.

6. Гемке Р. Г., Неисправности электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.

7. Сахновский Н. Л. и Юрчакевич Е. Р., Проверка неисправности стержней роторов асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, «Электрические станции», 1961, № 12.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Основные электрические параметры и геометрические размеры короткозамкнутых обмоток	5
2. Классификация и конструктивные формы короткозамкнутых обмоток роторов	10
3. Повреждения короткозамкнутых обмоток в процессе эксплуатации	42
4. Ремонт беличьих клеток	55
Литература	72